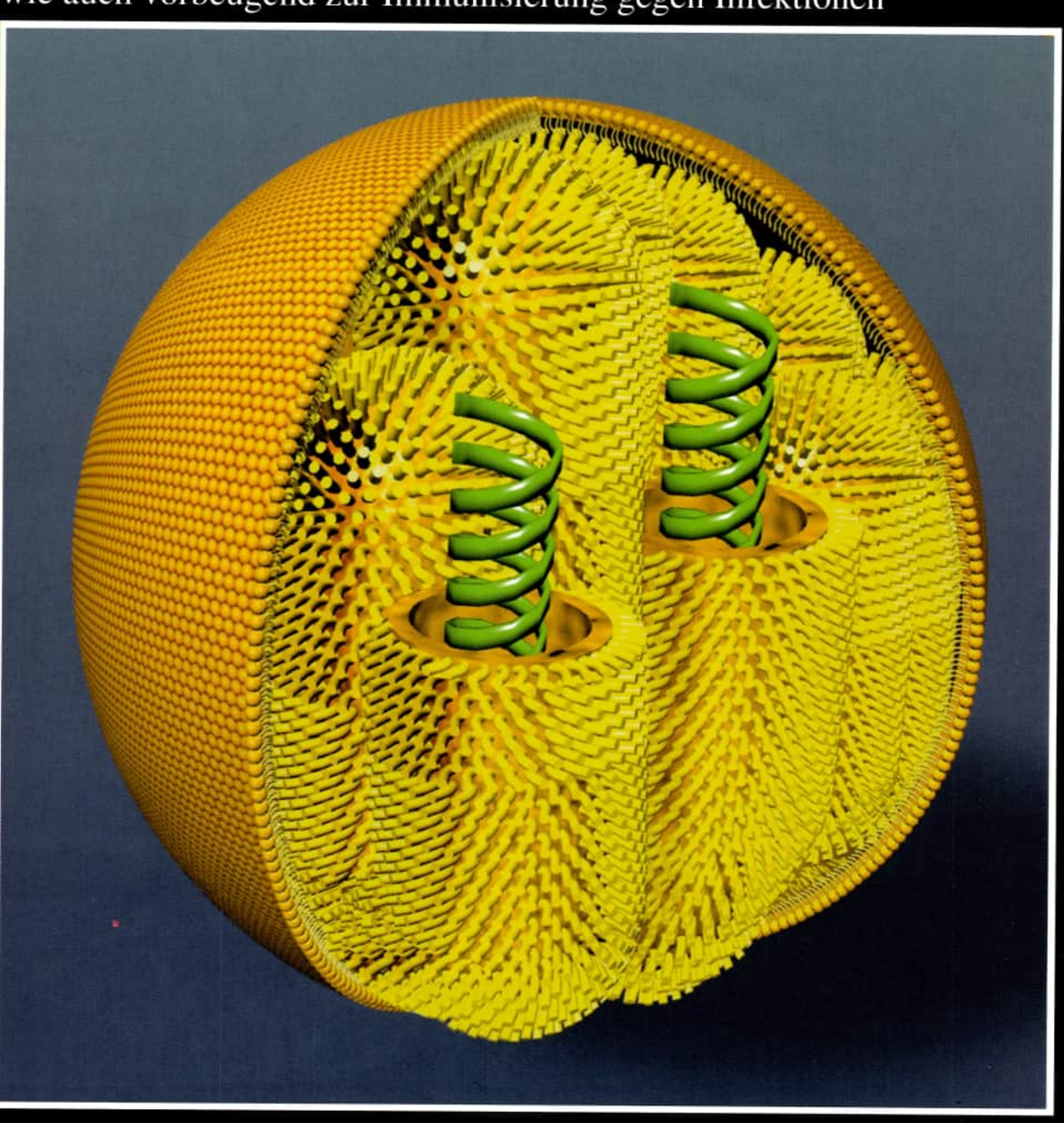
November 11/1997 12,50 DM 12,50 sfr / 95 öS / 305 Flux / 15 000 Lire

4 394058 412509 11

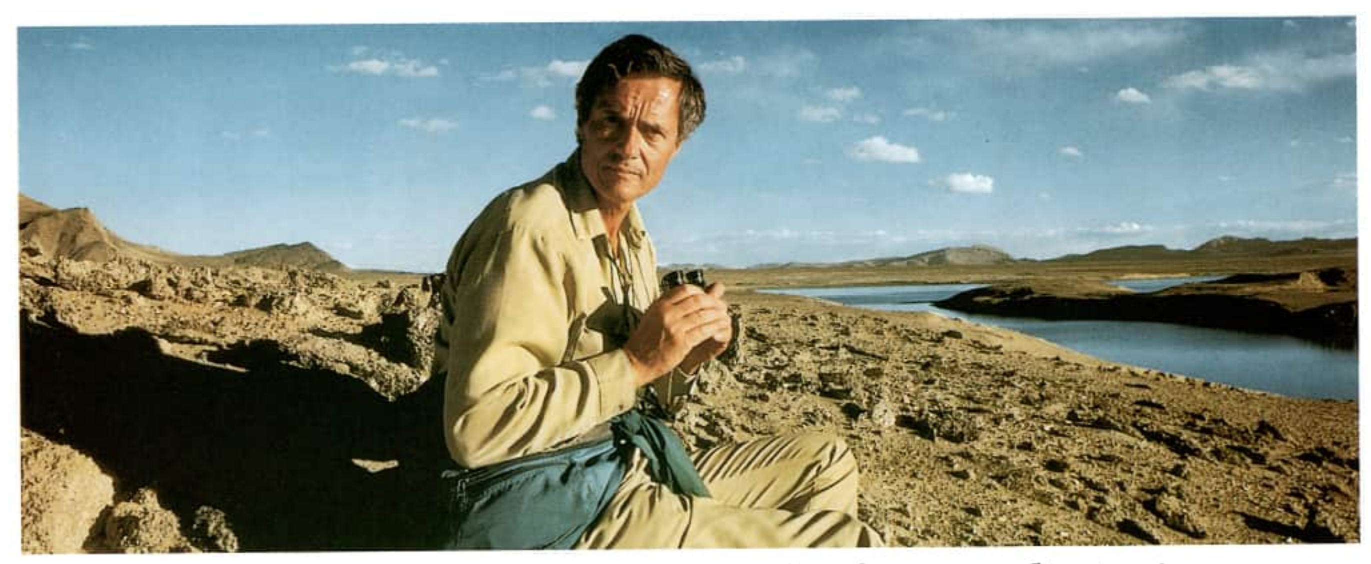
Spektrum DER WISSENSCHAFT

Gentherapie: Nackt oder in Hüllen aus geladenen Molekülen läßt sich DNA in menschliche Zellen einschleusen – zu therapeutischen Zwecken wie auch vorbeugend zur Immunisierung gegen Infektionen

sche Ausgabe von
IENTIFIC
IERICAN



D 6179 E



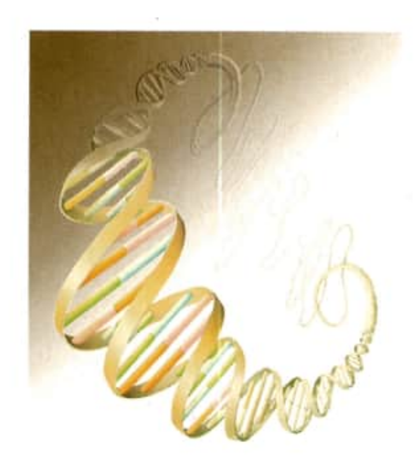


OFFICIALLY SWISS CERTIFIED CHRONOMETER
ROLEX
OYSTER PERPETUAL
DATEJUST
28



November 1997

Verehrte Leserin,
sehr geehrter Leser,



letztlich ist die Entwicklung des Lebens die schon mehr als dreieinhalb Jahrmilliarden währende Geschichte eines einzigen, allerdings schier unvorstellbar versatilen Moleküls, der Desoxyribonucleinsäure oder kurz DNA. Die hier sehr vereinfachte Darstellung deutet das Dunkel des Ursprungs an, veranschaulicht aber die wesentlichen Merkmale: die im Vergleich zu anderen Zellinhaltsstoffen wie selbst den komplexesten Proteinen überragende Größe, den Aufbau aus lediglich vier Elementen, nämlich den Nucleotiden mit den Basen Adenin (*A*), Cytosin (*C*), Guanin (*G*) und Thymin (*T*), deren paarweise Kopplung nach dem Schema *A–T* oder *T–A* und *C–G* oder *G–C*, wodurch sich jeweils zwei komplementäre Stränge zu einer Art Schraube mit doppeltem Gewindeschnitt – einer Doppelhelix – einander anlagern können, aber auch von einem Strang ein getreues Replikat ähnlich dem photographischen Prinzip Negativ/Positiv gezogen werden kann, sowie die unverzweigte Verkettung der Nucleotide.

Eben aufgrund der linearen Verknüpfung vermögen die vier Bausteine eine schriftartige Reihenfolge zu bilden, so daß die DNA zum Träger der genetischen Information werden konnte. Dieses wundersame Gebilde, bei allen Organismen nur zwei Nanometer (millionstel Millimeter) breit, hat denn auch an Länge durch die Evolution immens zugenommen: Mißt das jüngst komplett aufgeklärte Genom des bakteriellen Einzellers *Escherichia coli* mit etwa 4,2 Millionen Basenpaaren gestreckt 1,3 Millimeter, so das in menschlichen Ei- und Samenzellen mit drei Milliarden Basenpaaren rund einen Meter. Die Konstruktions- und Funktionsanleitung für unsere Körper, in etwa 100 000 Genen niedergelegt und auf 23 Chromosomenpaare verteilt, enthält allerdings als stammesgeschichtliche Altlast über weite Strecken Sequenzen ohne erkennbaren Sinn. Wenn das Human-Genom-Projekt all die Basen-Kürzel aufgeschlüsselt hat, dürften sie 400 000 Seiten vom Format dieser Zeitschrift füllen; der Vier-Buchstaben-Text würde mithin mehr als 3300 Hefte ohne Abbildungen und Anzeigen umfassen.

An diese fundamentalen Erkenntnisse, längst Schulbuch-Wissen, erinnere ich nicht bloß, weil ich sie nach wie vor faszinierend finde, sondern weil über kurzschlüssig euphorischen wie apokalyptischen Visionen der wahre, rasch anwachsende Reichtum der Molekularbiologie und verwandter Forschungszweige leicht übersehen wird. Erst im September hatten wir den Digest „Gene und Genome" veröffentlicht; doch allein in dieser Ausgabe finden Sie wieder drei einschlägige Beiträge (Seiten 14, 25 und 50) – darunter den zweiten einer Folge von vier Artikeln zu neuen Ansätzen der Gentherapie, die noch Krebs und Hirndegeneration zum Thema haben wird.

Ihr
Albrecht Kunkel



November 1997

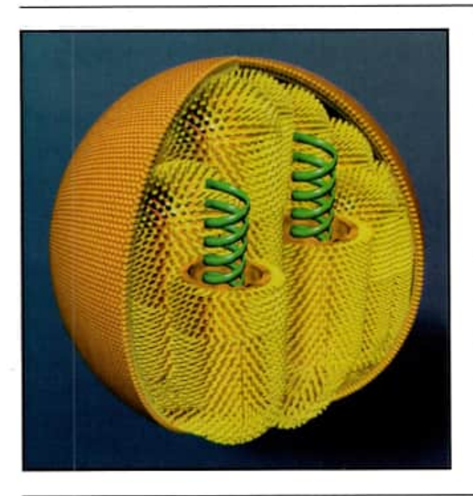
Zum Titelbild

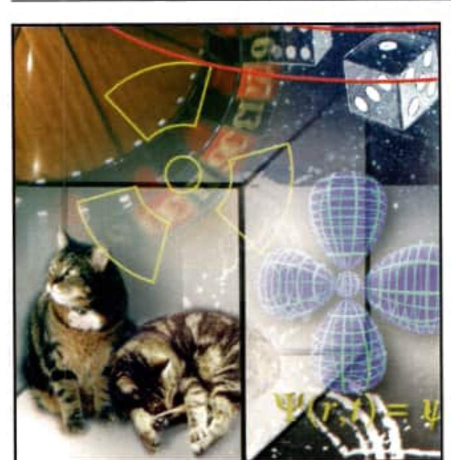
Die Rezeptur für spezielle Genfähren ist im Prinzip simpel: Man löse die zu transferierende Erbsubstanz (grün) mit etwa dem Achtfachen ihrer Masse an positiv geladenen Lipiden (gelb). Das Resultat sind sogenannte Lipoplexe, Gebilde wie das schematisch dargestellte. Die fettartigen Moleküle richten sich in besonderer Weise aus: mit ihrem positiv geladenen Kopf (bräunlich) zur negativ geladenen DNA oder zum wässerigen Außenmedium, mit ihren wassermeidenden Schwänzen (hellgelb) hingegen sandwichartig zu denen ihres gleichartigen Gegenübers. Anders als virale Genvehikel lösen Lipoplexe keine Abwehrreaktionen im Organismus aus. Ihre Vor- und Nachteile beschreibt einer ihrer Entwickler, Philip L. Felgner, von Seite 50 an.

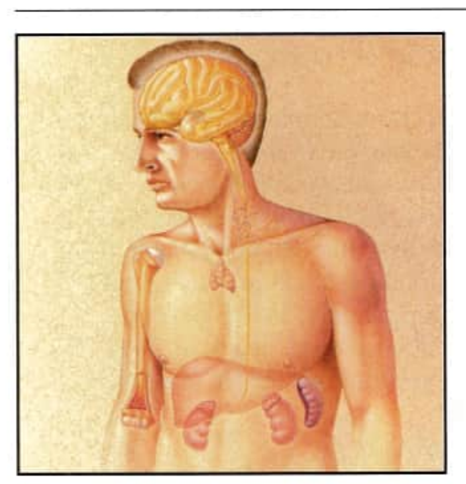
Mathematische Unterhaltungen

Monatsspektrum







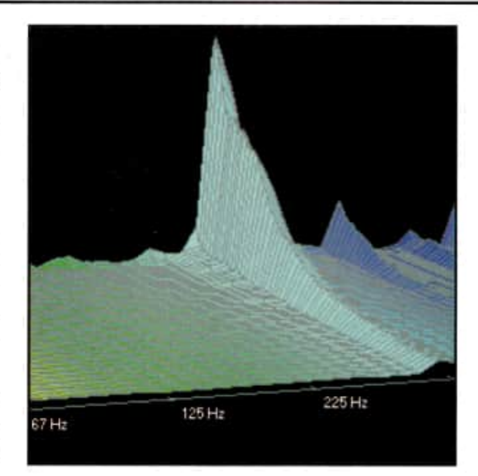


Trends in der Musiktechnik I

Digitale Klangerzeugung

Von Thoralf Abgarjan und Klaus-Dieter Linsmeier

Spezielle Hard- und Software macht aus Computern Musikinstrumente. Verschiedene Verfahren modellieren den Klang oder das ihn hervorbringende Instrument. Das Hörerlebnis kommt dem bei akustomechanischen Vorbildern immer näher, doch auch noch bislang ungehörte Klänge lassen sich formen. 74



Asbest: Aufstieg und Fall eines Wunderwerkstoffs

Von James E. Alleman und Brooke T. Mossman

Seit mehr als 2000 Jahren nutzt die Menschheit die einzigartigen Eigenschaften des faserartigen Silicatminerals. Auf seine Glorifizierung Anfang des Jahrhunderts folgte vor 20 Jahren die ebenso überzogene Verdammung. 86



Die Geheimakte Lew Landau

Von Gennady Gorelik

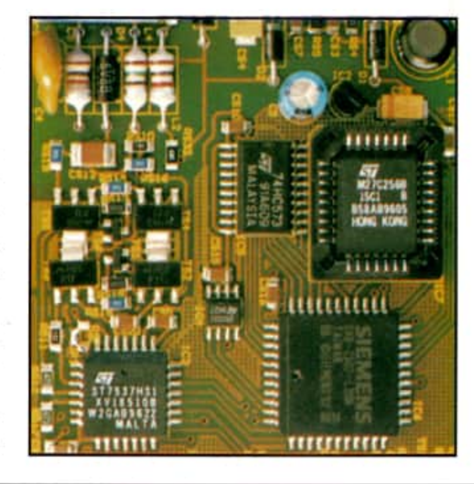
Der geniale sowjetische Physiker galt bisher als unpolitischer Gelehrter, der die Repressalien der Stalin-Ära passiv erduldet habe. Doch aus neuerdings zugänglichen Dokumenten der Geheimpolizei geht hervor, daß er in einem Manifest zum Sturz Stalins aufrief und nur knapp einem Ende in Straflagern entging. 94



Entwicklung & Technologie

Intelligente Haustechnik

Mit Beiträgen von Ludwig Brackmann und J.-Uwe Varchmin (Häusliche Automation mit *European Home Systems*), Thomas Heimer (Integrierte Haustechnik aus volkswirtschaftlicher Sicht), Erhard Mayer (Messen und Einstellen thermischer Behaglichkeit), Felix Schrimpf und Uli Doberer (Ein geräteübergreifendes Steuerungssystem) sowie Jan de Boer (Intelligente Lichtversorgung in Zweckbauten). 102



Forschung und Gesellschaft

Buchbesprechungen

Weitere Rubriken



Abb.: mit Sonderausstattung.

Briefe an die Redaktion

Monatspektrum
April 1997

Die von Johann M. Burchard in seinem Beitrag „Neues zur akustischen Funktion der Ohrmuschel“ angestellten Experimente berücksichtigen nur die Schallaufnahme durch das Ohr in der künstlichen Situation eines schalltoten Raumes, das heißt ohne Nachhall, ohne Störgeräusche und ohne Luftbewegung. Solche Untersuchungen sind zwar unerläßlich für einige grundlegende Fragen, sie reichen aber nicht aus, um alle oder auch nur die wichtigsten Faktoren erhellen zu können, die in der Evolution bei der Ausdifferenzierung der Ohrmuscheln wirksam waren.

Die Erkenntnis, daß die Ohrmuschel beim Menschen zur Lokalisation von

---



Chefredaktion: Albrecht Kunkel (verantwortlich für den Inhalt); Sekretariat: Erika Achberger, Tel. (0 62 21) 504-711
Redaktion: Dr. Inge Hoefer (Stellvertreterin des Chefredakteurs; -714), Dr. Klaus-Dieter Linsmeier (-717), Dr. Christoph Pöppe (-719), Dr. Uwe Reichert (-718), Dr. Michael Springer (-752), Dr. Adelheid Stahnke (-715), Dr. Gerhard Trageser (Stellvertreter des Chefredakteurs; -713);
Online-Redaktion: Elke Reinecke, Olaf Fritsche, Christoph Roloff;
Vangerowstraße 20, 69115 Heidelberg;
Fax (0 62 21) 50 47 51;
e-mail: redaktion@spektrum.com;
CompuServe 100342,2416.
Büro Bonn: G. Hartmut Altenmüller, Uckerather Straße 57, 53639 Königswinter; Postfach 3228, 53627 Königswinter; Tel. (0 22 44) 43 03, Fax: (0 22 44) 63 83.
Korrespondenten: Dieter Beste, Marion Kälke; MediaKonzept, Heinrichstraße 24, 40239 Düsseldorf; Tel. (02 11) 908 33 57, Fax (02 11) 908 33 58; e-mail: 100630.3376@compuserve.com.
Produktion: Klaus Mohr, Tel. (0 62 21) 504-730.
Layout: Sibylle Franz, Karsten Kramarczik, Martina Pailer.
Marketing und Vertrieb: Annette Baumbusch, Markus Bossle; Tel. (0 62 21) 504-741/742, e-mail: marketing@spektrum.com.
Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Vangerowstraße 20, 69115 Heidelberg; Tel. (0 62 21) 504-60, Fax (0 62 21) 50 47 51. Geschäftsführer: Claus-G. Firchow.
Leser-Service: Marianne Blume; Tel. (0 62 21) 504-743, e-mail: marketing@spektrum.com.
Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft, Boschstraße 12, 69469 Weinheim, Tel. (0 62 01) 60 61 50, Telex 04 65 516 vchwd d; Fax (0 62 01) 60 61 17.
Bezugspreise: Einzelheft DM 12,50/sfr 12,50/öS 95,–; im Abonnement DM 131,40/öS 1038,– für 12 Hefte inkl. DM 10,80 Versandkosten; im Ausland zuzüglich DM 21,– Versandkostenanteil, für Studenten (gegen Studiennachweis) 112,80 DM für 12 Hefte inkl. DM 10,80 DM Versandkosten; im Ausland zuzüglich DM 21,– Versandkostenanteil. Zahlung sofort nach Rechnungserhalt. Konten: Deutsche Bank, Weinheim, 58 36 43 202 (BLZ 670 700 10); Postbank Karlsruhe 13 34 72 759 (BLZ 660 100 75).
Anzeigen: GWP media-marketing, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH, Bereichsleitung Anzeigen: Winfried Veeh, Anzeigenleitung: Gerlinde Volk, verantwortlich für Anzeigen: Gabriele Reichard, Kasernenstraße 67, Postfach 10 26 63, 40017 Düsseldorf, Tel. (02 11) 887-2341/93, Fax (02 11) 37 49 55, Teletex 2114028.
Anzeigenvertretung: Berlin-West: Rainer W. Stengel, Bischofsgrüner Weg 91, 12247 Berlin, Tel. (0 30) 7 74 45 16, Fax: (0 30) 7 74 66 75; Berlin-Ost: Gunter-E. Hackemesser, Oranienstraße 155–158, 10969 Berlin, Tel. (030) 6 16 86-150, Fax (0 30) 6 15 90 05, Telex 114810; Hamburg: Burchardstraße 17, 20095 Hamburg, Tel. (0 40) 30 18 31 83, Fax (0 40) 33 90 90; Hannover: Egon F. Naber, Sextrostraße 3-5, 30169 Hannover, Tel. (05 11) 9 88 47 14, Fax (05 11) 8 09 11 23; Düsseldorf: Herbert Piehl, Cornelia Koch, Hohe Straße 16, Postfach 10 11 02, 40002 Düsseldorf, Tel. (02 11) 887-23 98, Fax (02 11) 13 39 74; Frankfurt: Dr. Friedrich A. Rode, Thomas Düwel, Große Eschenheimer Straße 16-18, 60313 Frankfurt am Main, Tel. (0 69) 92 01 92 82/-83, Fax (0 69) 92 01 92 88; Stuttgart: Erwin H. Schäfer, Königstraße 20, 70173 Stuttgart, Tel. (07 11) 22 475 41, Fax (07 11) 22 475 49; München: Reinold Kassel, Karl-Heinz Pfund, Josephspitalstraße 15, 80331 München, Tel. (0 89) 54 59 07-12, Fax (0 89) 54 59 07-16;
Druckunterlagen an: GWP-Anzeigen, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. (02 11) 8 87-23 84, Fax (02 11) 37 49 55.
Anzeigenpreise: Zur Zeit gilt die Anzeigenpreisliste Nr. 18 vom 1. Januar 1997.
Gesamtherstellung: VOD – Vereinigte Offsetdruckereien GmbH, D – 69214 Eppelheim.

ISSN 0170-2971

Bildnachweise
Titelbild: Slim Films (Quelle: Bruce P. Graber, Naval Research Laboratory) – Brief an die Leser: Tomo Narashima und Laurie Grace – Mathematische Unterhaltungen: 1: Johnny Johnson; 2: Bryan Christie; 3: Jennifer C. Christiansen – Monatsspektrum: S. 15, 16: Christian Jung, Universität Kiel; S. 22 (l.): Masaru Okabe, Universität Osaka; S. 22 (r.): „Nature“, Band 383, Seite 485; S. 28, 32: G. Tarrach, M. A. Bopp, M. A. Lieb, A. J. Meixner und L. Novotny; S. 30/31 (o.): Rachel Taylor; S. 30/31 (u.): Stephen Dalton, Animals Animals – FORUM: Industrieforschung: S. 35, 38, 41, 43: Ulrich Zillmann; S. 36, 37: Siemens AG; S. 39, 42, 44: Axel Weigend; S. 40 Bayer AG; S. 46: DECHEMA; S. 48: Papiertechnische Stiftung – Gentherapie: nicht-virale Strategien: 1, 2: Slim Films (Quelle: Bruce P. Graber, Naval Research Laboratory); 3: Michael Welsh, University of Iowa; 4: Philip L. Felgner; 5: Peter Yates, Saba – Trends in der Physik: Das zähe Leben von Schrödingers Katze: 1: Digitale Komposition von Jeff Brice (Wigner-Funktion mit freundlicher Genehmigung von Matthias Freyberger, Universität Ulm); 2 – 4, Kasten S. 50/51: Jared Schneidman Design; 5: Michael Noel und Carlos Stroud, University of Rochester – Psyche, Stress und Krankheitsabwehr: 1 – 4: Roberto Osti; 5, 6: Laurie Grace – Trends in der Musiktechnik: Digitale Klangerzeugung: 1 (o.): Max V. Matthews, CCRMA/Music, Stanford University; 1 (u.): Jean-Claude Risset, Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique; 2 (o.), 2 (M.), 5: Dr. Thoralf Abgarjan, Yamaha Europa; 2 (u.), 6 – 8: Dr. Thoralf Abgarjan, Yamaha Europa/Spektrum der Wissenschaft; 3, 4 (u.): Spektrum der Wissenschaft; 4 (o.): Yamaha, zur Verfügung gestellt von „KEYS – Magazin für Musik und Computer“; Kasten S. 84: Dr. Thoralf Abgarjan, Yamaha Europa, erstellt mit LogicAudio – Asbest: Aufstieg und Fall eines Wunderwerkstoffs: S. 86 – 91 (fortlaufend): Rohr: Bryan Christie; brennender Asbest: mit freundlicher Genehmigung von Malcolm Ross, photographiert von Jason Goltz; Vestalinnen: Tomo Narashima; Salamander: mit freundlicher Genehmigung der British Library; Börse: mit freundlicher Genehmigung des Natural History Museum, London; Isolierung, Dachpappe: Scientific American; Anzeige: University of Delaware Library, Newark/DEL.; Indiana State Capitol: Bass Photo Company Collection, Indiana Historical Society Library; Lady Asbestos: Smithsonian Institution Libraries; Telephon: Superstock; Automobil: Corbis-Bettmann; Asbestos Man: Museum of the City of New York; Wicked Witch: The Kobal Collection; Anzug: UPI/Corbis-Bettmann; Haus: Superstock; Gebäude-Sanierung: John Chiasson, Gamma-Liaison; Space-Shuttle: NASA; Kasten S. 89: John A. Underwood, Purdue University – Die Geheimakte Lew Landau: 1, 2, 3 (l.), 3 (M.), Kasten S. 98, 4: mit freundlicher Genehmigung von Gennady Gorelik; 3 (r.): AIP Emilio Segrè Visual Archives – Entwicklung & Technologie: Intelligente Haustechnik: S. 103, 104: Aticon Home Automation, Braunschweig, S. 105: Technische Universität Braunschweig; S. 107: Fagor Electrodomésticos; S. 109 (l.), S. 110, S. 113, 114: Fraunhofer-Institut für Bauphysik/Spektrum der Wissenschaft; S.109 (r.): Fraunhofer-Institut für Bauphysik; S. 111: Bosch Domotik; S. 112: Bosch Domotik/Spektrum der Wissenschaft; S. 116: Thomas Emsting, Königswinter – Forschung und Gesellschaft: S. 122/123: Schweizerische Stiftung für Landschaftsschutz und Landschaftspflege, Bern; S. 131: Eberhard Laue, Reichenberg .

Übersetzer
An diesem Heft wirkten mit: Immo Diener, Ingrid Glomp, Markus Hölscher, Marianne Kolter, Christina Künzel, Peter Schütz.

Beilagenhinweis
Ein Teil unserer Auflage enthält Beilagen des Spick-Verlages, Zürich. Wir bitten unsere Leser um Beachtung.

SCIENTIFIC AMERICAN

Editor in chief: John Rennie.
Board of Editors: Michelle Press (Managing Editor), Philip M. Yam (News Editor), Ricki L. Rusting, Timothy M. Beardsley, Gary Stix (Associate Editors), Corey S. Powell (Electronic Features Editor), W. Wayt Gibbs, Kristin Leutwyler, Madhusree Mukerjee, Sasha Nemecek, David A. Schneider, Glenn Zorpette;
Marguerite Holloway, Paul Wallich (Contributing Editors).
Associate Publishers: Richard Sasso (Production), Lorraine Leib Terlecki (Circulation).
Administration: Joachim P. Rosler (Publisher).
Chairman and Chief Executive Officer: John J. Hanley.
Corporate Officers: Robert L. Biewen, Frances Newburg, Joachim P. Rosler (Vice Presidents)
Anthony C. Degutis (Chief Financial Officer).

Schallquellen – insbesondere für die Unterscheidungen vorn/hinten und oben/unten – beiträgt, gehört seit etwa 20 Jahren zur festen Lehrmeinung. Es ist also nicht zutreffend, wie der Autor schreibt, daß Charles Darwins Ansicht, die Gestalt der Ohrmuschel sei funktionslos, immer noch gängige Lehrmeinung sei.

Vor 30 Jahren (1967) habe ich zusammen mit G. Steimann eine weitere wichtige Funktion der Ohrmuschel nachgewiesen, die viel zu wenig beachtet wird. Unter natürlichen Umweltbedingungen kommt es nämlich weniger darauf an, leiseste Geräusche und Sprache in absoluter Stille hören und orten zu können, sondern diese Fähigkeit sollte auch in bewegter Luft, das heißt bei Wind oder eigener schneller Fortbewegung, erhalten bleiben. Wenn man mit einem Studio-Mikrophon Tonaufnahmen im Freien machen will, so erhält man schon bei schwacher Luftbewegung Windgeräusche, die um so störender sind, je empfindlicher das Mikrophon ist. Für Außenaufnahmen sind deshalb spezielle Umhüllungen für das Mikrophon entwickelt worden, um die Windgeräusche zu minimieren.

Dieses Problem war sicherlich auch bei der Evolution im Tierreich wirksam, als aus verschiedenen entwicklungsgeschichtlichen Gründen das Trommelfell von der Körperoberfläche (wie bei Amphibien) in die schützende Tiefe des knöchernen Schädels (wie eben bei den Säugetieren) verlagert wurde, so daß ihm eine Röhre – der äußere Gehörgang – vorgeschaltet werden mußte. Diese Röhre wird von vorbeistreichender Luft wie ein hohler Schlüssel angeblasen und erzeugt ein Geräusch im Frequenzbereich seiner Eigenresonanz. Die Eigenresonanz ist aber wiederum so ausgelegt, daß sie zur Verstärkung des Schalldruckes am Trommelfell gerade in dem Frequenzbereich beiträgt, für den das Innenohr seine größte Empfindlichkeit hat.

Zur Klärung der Frage, welche Rolle die menschliche Ohrmuschel für das Hören im Wind spielt, haben wir 1967 von der Universitäts-HNO-Klinik Heidelberg aus in Zusammenarbeit mit dem Institut für Strömungslehre und Strömungsmaschinen der Technischen Hochschule Karlsruhe im Windkanal entsprechende Versuche angestellt. In einen Modellkopf war ein menschliches Felsenbein eingesetzt, das an Stelle des Trommelfelles mit einem Meßmikrophon ausgestattet war. Der knorpelige Gehörgang und eine abnehmbare Ohrmuschel waren naturgetreu aus plastischem Material nachgebildet. Der Kopf, auf eine Büste einer Schaufensterpuppe und eine Drehscheibe montiert, konnte über einen Seilzug im Windkanal gedreht werden. Der vom Mikrophon aufgenommene Schall wurde über Kopfhörer abgehört und gleichzeitig auf Tonband aufgezeichnet, gemessen und einer Terzfilteranalyse unterzogen. Untersucht wurde das Windgeräusch bei allen Einfallswinkeln in Abständen von jeweils 10 Grad bei Windgeschwindigkeiten von 20 bis 60 Kilometern pro Stunde, und zwar mit und ohne Ohrmuschel. Weitere Versuche betrafen den Einfluß von etwas lockerer Watte im Gehörgang als Nachahmung einer dichten Behaarung, wie sie bei vielen Tierarten zu finden ist, sowie die Wahrnehmung eines gerichteten gepulsten Signalschalles, der in Höhe des Kopfes außerhalb des Windstromes – also senkrecht zu diesem – abgestrahlt wurde. Schließlich wurden auch an einem größeren Modell einer Ohrmuschel die Strömungslinien und Turbulenzen dargestellt und in Filmaufnahmen ausgewertet.

Es zeigte sich, wie zu erwarten, daß die Ausrichtung des Ohres zur Windrichtung der wichtigste Faktor bei der Entstehung der Windgeräusche ist. Wenn das Ohr dem Wind direkt zugewandt ist oder, nach Drehung um 180 Grad, sich im Windschatten befindet, hat das Windgeräusch sein Minimum. In dieser Position hat auch die Ohrmuschel keinen nennenswerten Einfluß. Bei allen anderen Einfallswinkeln hingegen hat die Ohrmuschel einen deutlich dämpfenden Effekt auf die Windgeräusche. Das Windgeräusch erreichte bei Windrichtung von vorn und einer Windgeschwindigkeit von 30 Kilometern pro Stunde („frische Brise") im Frequenzbereich von 500 bis 2000 Hertz mit Ohrmuschel etwa 75 dB, ohne Ohrmuschel 85 dB. Bei Windgeschwindigkeiten von 50 bis 60 Kilometern pro Stunde wurden Geräuschstärken um 90 bis 100 dB erreicht. Bei Windrichtung von hinten wurde das Windgeräusch durch die Ohrmuschel im Frequenzbereich von 100 bis 500 Hertz um mehr als 15 dB gedämpft. Durch etwas Watte im Gehörgang wird das Frequenzspektrum des Windgeräusches geglättet, wobei besonders der Gipfel um 2000 Hertz, entsprechend der Resonanzfrequenz des Gehörganges, abgeflacht wird.

Für das Hören eines Signals im Windstrom gibt es dementsprechend verschiedene Optimum- und Pessimum-Stellungen. So wurde das Signal besonders schlecht oder gar nicht gehört, wenn das Ohr der Schallquelle direkt zugewandt war und der Wind von vorn kam; dagegen wurde es gut gehört, wenn das Ohr in die Windrichtung zeigte und der Schall von hinten kam oder wenn der Wind von hinten kam und das Ohr der Schallquelle abgewandt war.

Viele Tiere, zum Beispiel Rotwild oder Pferde, können ihre Ohren so drehen, daß sie zwischen Windrichtung und dem akustisch zu überwachenden Raumwinkel ein Optimum finden. Vögel und Säugetiere wie die Elefanten haben mit der Abdeckung des Gehörgangs durch Federn beziehungsweise eine große Ohrmuschel andere Techniken entwickelt, die sicherlich auch der Unterdrückung von Windgeräuschen dienen. Beim menschlichen Ohr treten bei Luftbewegungen Turbulenzen im Bereich der Gehörgangsöffnung auf, durch die ein Einschwingen der Resonanzfrequenz wie beim gleichmäßigen Anblasen einer gedackten Pfeife vermieden wird. Dies scheint die beobachtete Wirkung wenigstens zum Teil zu erklären.

Diese Untersuchungen waren Anlaß für meinen früheren Mitarbeiter Karl-Bernd Hüttenbrink, jetzt Direktor der Universitäts-HNO-Klinik in Dresden, die ersten Messungen von Windgeräuschen im Ohr beim Motorradfahren anzustellen und danach den Bau geräuscharmer Motorradhelme zu entwickeln.

Prof. Dr. med. Harald Feldmann
ehemaliger Direktor der
Universitäts-Hals-Nasen-Ohren-Klinik,
Münster.

Buchbesprechungen
Juni 1997

Auf Seite 141 hat Thomas Rubitzko „Aristoteles, Einstein & Co." von Ernst Peter Fischer besprochen und die Darstellung des Autors kritisiert, Galileo Galilei hätte „beim Anblick eines schwingenden Kronleuchters erkannt, daß die Schwingungsdauer unabhängig von der Pendellänge sei".

Es ist tröstlich, daß selbst die Feststellung einer Unkorrektheit unkorrekt sein kann und damit die Unschärferelation auch für den menschlichen Geist gilt. Auf Seite 104 des Buches steht tatsächlich: „Der Legende zufolge soll Galilei beim Anblick eines schwingenden Leuchters im Dom von Pisa aufgefallen sein, daß die Dauer einer Pendelbewegung (hin und her) ziemlich unabhängig von der Weite der Schwingung ist." Das allerdings ist korrekt, denn die Auslenkung ist etwas anderes als die Pendellänge. Trotzdem ist die Rezension aber treffend und weckt völlig zu Recht Lust auf die Lektüre.

Jules Schöder
Architekt;
Wetzikon (Schweiz).

Mathematische Unterhaltungen

Die Maßzahl des Goldenen Schnitts hat eine kleine Schwester. Kaum jemand spricht von ihr; dabei sind die Zusammenhänge, in denen sie auftaucht, mindestens so vielfältig – und manchmal sogar eine Dimension höher.

Von Ian Stewart

In den mathematischen Skulpturen, die ich im letzten Monat beschrieben habe, verwendet der Architekt Alan St. George mehrfach die Maßzahl des Goldenen Schnitts. Sie gilt von alters her als besonders edel, denn sie ist das Verhältnis zweier Streckenlängen, deren Summe sich zur größeren verhält wie die größere zur kleineren. Neuerdings bedeutet „edel" im mathematischen Sprachgebrauch nicht nur „von besonders einfacher Proportion", sondern auch „besonders irrational". Ausgerechnet die goldene Zahl läßt sich so schlecht durch rationale Zahlen approximieren, daß sie dem Angriff des Chaos am längsten standhält (Spektrum der Wissenschaft, Dezember 1994, Seite 86).

Der Katalog der Ausstellung, die St. George 1995 in Lissabon zeigte, erwähnt auch eine weniger berühmte Verwandte dieser Zahl und verweist auf eine Artikelfolge, in welcher „der Architekt Richard Padovan die Geheimnisse der ‚Plastikzahl' enthüllt" habe. Sie wird in alten mathematischen Texten kaum erwähnt, was in Anbetracht ihrer geometrischen Qualitäten durchaus merkwürdig ist; aber ihre mathematische Abkunft ist fast ebenso edel wie die ihrer goldenen Schwester. In der Natur scheint sie nicht so häufig vorzukommen, aber bisher hat wohl auch kaum jemand nach ihr Ausschau gehalten.

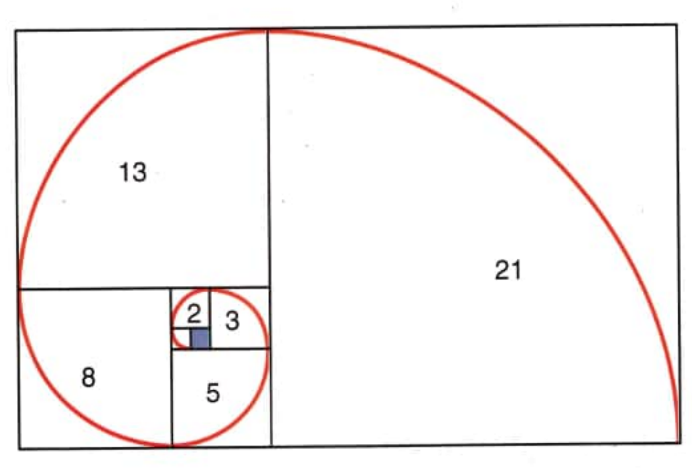
Zum Vergleich will ich mit der goldenen Zahl beginnen. Ihr Wert beträgt $\varphi = 1 + 1/\varphi = 1{,}618\,034\ldots$. Sie hängt eng mit der vielzitierten Fibonacci-Folge (Spektrum der Wissenschaft, November 1995, Seite 10) zusammen, die sich unter anderem durch ein spiralförmiges System von Quadraten veranschaulichen läßt (Bild 1 links). Das blaue Ausgangsquadrat hat die Seitenlänge 1, ebenso das links anschließende Nachbarquadrat. An das so entstehende Rechteck mit den Seitenlängen 1 und 2 legt man reihum im Uhrzeigersinn weitere Quadrate an, so daß sich immer wieder ein Rechteck ergibt: zunächst oben ein Quadrat der Seitenlänge 2, dann rechts eines mit der Seitenlänge 3; es folgen die Seitenlängen 5, 8, 13, 21 und so weiter. Diese Zahlen bilden die Fibonacci-Folge. Jedes Glied ist die Summe seiner beiden Vorgänger.

Das Verhältnis aufeinanderfolgender Fibonacci-Zahlen nähert sich der goldenen Zahl immer mehr an. Beispielsweise ist schon $21/13 = 1{,}615\,384\ldots$. Das folgt aus dem Bildungsgesetz der Folge. Für das genannte Verhältnis ergibt sich im Grenzfall die Gleichung $\varphi = 1 + 1/\varphi$.

Wenn man in jedes Quadrat einen Viertelkreisbogen einfügt, schließen sich diese Bögen zu einer eleganten Spirale aneinander – eine gute Näherung an die sogenannte logarithmische Spirale, die man auch in der Natur wiederfindet, etwa in der Schale des Perlbootes *Nautilus*, eines lebenden Fossils aus der Klasse der Kopffüßer. Aufeinanderfolgende Windungen haben ungefähr das Größenverhältnis des Goldenen Schnitts.

Nun zur Plastikzahl. Wir beginnen mit einem ähnlichen Diagramm, nur werden diesmal gleichseitige Dreiecke aneinandergefügt (Bild 1 rechts). An das Anfangsdreieck (blau) schließen sich im Uhrzeigersinn weitere Dreiecke an. Wieder ergibt sich durch Einfügen von Bögen eine annähernd logarithmische Spirale. Damit die Dreiecke zusammenpassen, haben die ersten drei sämtlich die Seitenlänge 1. Die nächsten beiden haben die Seitenlänge 2; es folgen 3, 4, 5, 7, 9, 12, 16, 21 und so weiter.

Auch diese Zahlen sind nach einer einfachen Regel gebildet: Jedes neue



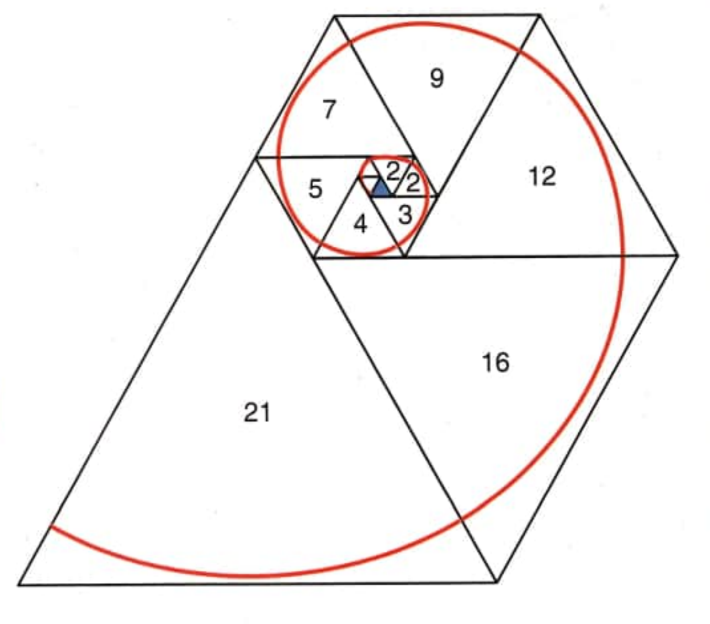


Bild 1: Wenn man Quadrate unterschiedlicher Größe spiralförmig aneinanderlegt, so daß in jedem Schritt wieder ein Rechteck entsteht, so ergeben sich für die Seitenlängen der Quadrate die Fibonacci-Zahlen (oben). Die Padovan-Zahlen erhält man, wenn man das Verfahren auf gleichseitige Dreiecke überträgt (rechts).

Wer? Wann? Wo? Was? Warum?

Irgend jemand wollte vor Ihnen wissen, wo er die Antwort auf alle Fragen finden kann.

Fragen Sie bei Ihrem Buchhändler nach dem Prospekt, der an dieser Stelle klebte, oder wenden Sie sich direkt an uns.

Der Harenberg Verlag ist in jeder Buchhandlung präsent



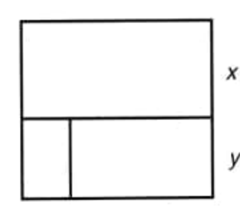
Harenberg Verlag
Telefon 0231/90 56-166
Telefax 0231/90 56-169
Postfach 10 18 52/62, 44018 Dortmund
Internet http://www.harenberg.de
E-Mail post@harenberg.de

Glied der Folge ist die Summe des vorletzten und des vorvorletzten. Nennen wir diese Folge die Padovan-Folge. Eine kleine Kuriosität am Rande: Padovan trägt seinen Namen, weil seine Vorfahren aus Padua (italienisch Padova) stammten; Leonardo Fibonacci (um 1170 bis nach 1240) stammte aus Pisa, was nur etwas mehr als 100 Kilometer von Padua entfernt ist. Padovan selbst nimmt allerdings keinen Entdeckerruhm für sich in Anspruch: Der französische Architekturstudent Gérard Cordonnier hatte die Plastikzahl bereits 1924 beschrieben, desgleichen 1928 der niederländische Benediktinermönch und Architekt Hans van der Laan.

In Formeln lauten die Bildungsgesetze für die Fibonacci-Zahlen f_n und für die Padovan-Zahlen p_n folgendermaßen: $f_{n+1} = f_n + f_{n-1}$ mit $f_0 = f_1 = 1$ beziehungsweise $p_{n+1} = p_{n-1} + p_{n-2}$ mit $p_0 = p_1 = p_2 = 1$. Die Familienähnlichkeit ist offensichtlich. Die Plastikzahl, deren Wert ungefähr gleich 1,324 718 ist und die ich ab jetzt p nennen will, ist der Grenzwert der Quotienten aufeinanderfolgender Padovan-Zahlen, steht also zu ihnen in derselben Beziehung wie die goldene Zahl zu den Fibonacci-Zahlen. Aus dem Bildungsgesetz folgt die Gleichung $p = 1/p + 1/p^2$ oder $p^3 - p - 1 = 0$. Die Zahl p ist die eindeutig bestimmte reelle Lösung dieser Gleichung.

Die Padovan-Folge wächst allerdings viel langsamer als die Fibonacci-Folge, weil p kleiner als φ ist. Es gibt in ihr zahlreiche interessante Strukturen zu entdecken. So zeigt Bild 1 rechts, daß die Seite eines neu anzufügenden Dreiecks so lang ist wie die des letzten Dreiecks und dessen vierten Vorgängers zusammen. Daraus ergibt sich zum Beispiel $p_{10} = 16 + 5 = 21$. Allgemein gilt $p_{n+1} = p_n + p_{n-4}$.

Wie für die goldene Zahl gibt es auch für ihre Plastikschwester eine geometrische Interpretation. John H. Bonnett Jr. aus Livingston (New Jersey) gab mir – unter anderem – folgenden Hinweis: Wenn man ein Quadrat wie in der nebenstehenden Figur in drei ähnliche Rechtecke zerlegt, stehen die beiden vertikalen Seiten x und y im Längenverhältnis p.



Manche Zahlen, zum Beispiel 3, 5 und 21, sind zugleich Fibonacci- und Padovan-Zahlen. Gibt es noch weitere? Wenn ja, wie viele? Unendlich viele? Einige Padovan-Zahlen sind auch Quadratzahlen, etwa 9, 16 und 49. Gibt es noch mehr davon? Die Wurzeln der drei genannten sind 3, 4 und 7, also wieder Padovan-Zahlen. Ist das Zufall, oder muß das immer so sein? Diese und viele weitere Fragen verdienen genaueres Nachforschen.

Robert T. Wainwright aus New Rochelle (US-Bundesstaat New York) fand Zusammenstellungen gleichseitiger Dreiecke verschiedener Größe, die den Dreiecksspiralen der Padovan-Folge verblüffend ähneln. Allerdings ging er von einer gänzlich anderen Aufgabe aus:

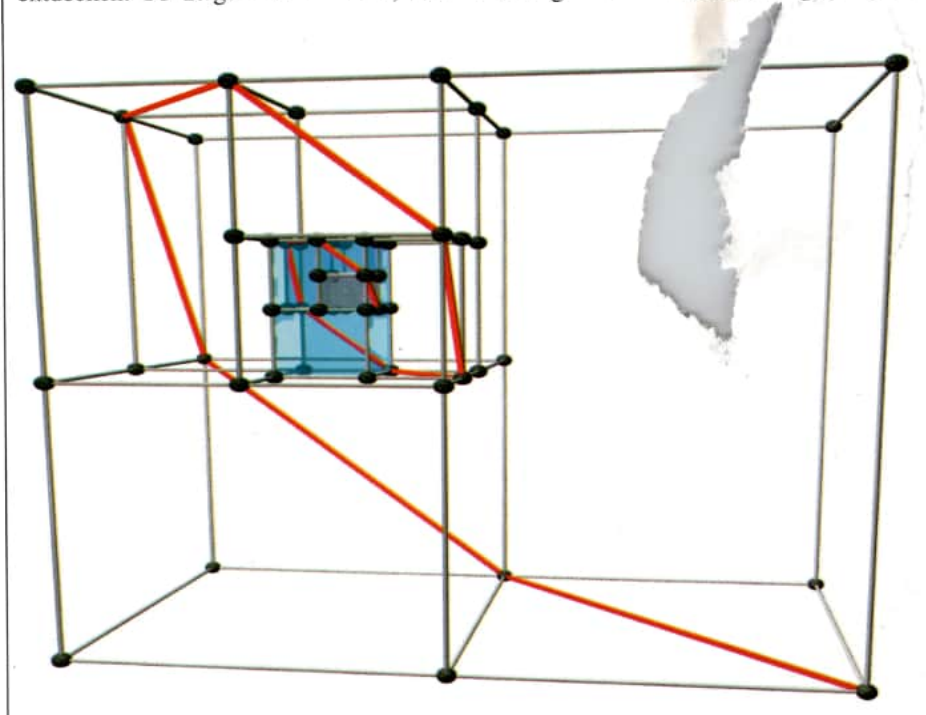


Bild 2: Eine Folge spiralförmig aneinandergelegter Quader mit der Eigenschaft, daß in jedem Schritt die Gesamtfigur wieder ein vollständiger Quader ist, liefert ebenfalls die Padovan-Zahlen. Ausgangsfigur ist ein Würfel mit der Kantenlänge 1.

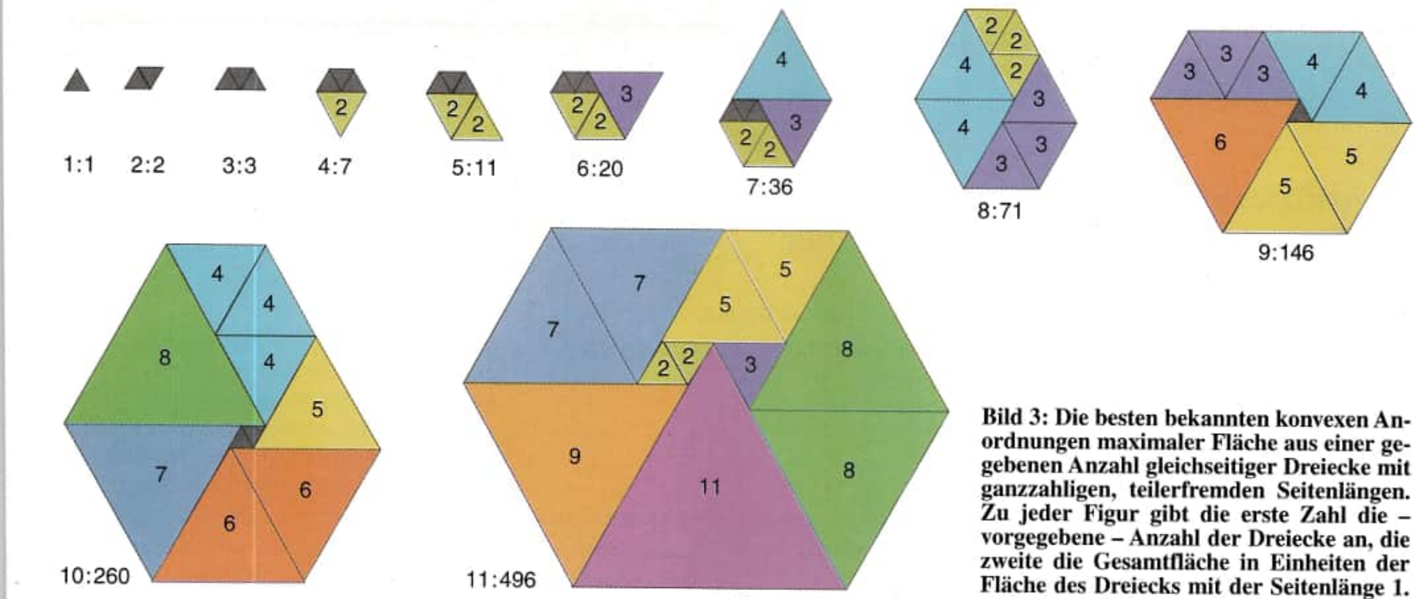


Bild 3: Die besten bekannten konvexen Anordnungen maximaler Fläche aus einer gegebenen Anzahl gleichseitiger Dreiecke mit ganzzahligen, teilerfremden Seitenlängen. Zu jeder Figur gibt die erste Zahl die – vorgegebene – Anzahl der Dreiecke an, die zweite die Gesamtfläche in Einheiten der Fläche des Dreiecks mit der Seitenlänge 1.

Welches ist die größte konvexe Fläche, die man aus einer gegebenen Anzahl gleichseitiger Dreiecke zusammensetzen kann, wenn die Seitenlängen dieser Dreiecke ganzzahlig, aber im übrigen frei wählbar sind? Konvex bedeutet, daß die Gesamtfigur keine einspringenden Ecken haben darf.

Wenn man eine Figur hat, welche die Bedingungen erfüllt, könnte man alle Längen mit 2 (oder einer anderen Zahl) multiplizieren und bekäme eine größere Figur. Um solche uninteressanten Fälle auszuschließen, stellt Wainwright die Zusatzbedingung, daß die Seitenlängen der Dreiecke keinen allen gemeinsamen Teiler haben dürfen. Die besten bekannten Zusammenstellungen sind bis zur Anzahl 7 (bis auf Spiegelungen) identisch mit der Padovan-Pflasterung (Bild 3). Können Sie die Liste verlängern?

Man kann Padovan-Zahlen auch erzeugen, indem man dreidimensional operiert. In diesem Falle beginnt die Spirale (Bild 2) mit einem Würfel der Kantenlänge 1. Legen Sie einen gleich großen Würfel daneben, so daß insgesamt ein $1 \times 1 \times 2$-Quader entsteht. Fügen Sie an eine seiner 1×2-Seitenflächen einen weiteren $1 \times 1 \times 2$-Quader an; das ergibt einen $1 \times 2 \times 2$-Quader. Legen Sie nun unter dessen 2×2-Bodenfläche einen $2 \times 2 \times 2$-Würfel, so daß als Gesamtfigur ein $2 \times 2 \times 3$-Quader resultiert. Mit einem $2 \times 2 \times 3$-Quader, angelegt an einer 2×3-Fläche, ergibt sich insgesamt ein $2 \times 3 \times 4$-Quader. Fügen Sie weitere Quader an, und zwar der Reihe nach in den Richtungen Osten, Süden, unten, Westen, Norden und oben. Jeder neu gebildete Quader hat als Kantenlängen drei aufeinanderfolgende Padovan-Zahlen.

Mehr noch: Wenn Sie quadratische Seitenflächen aufeinanderfolgender Quader mit Diagonalen versehen, so daß sich eine durchgehende Linie ergibt, ist diese Linie abermals – nun ja, in einer etwas eckigen Näherung – eine Spirale. Es stellt sich heraus, daß diese Spirale in einer Ebene liegt. Was für ein Gebilde entsteht wohl, wenn man das Quadersystem mit dieser Ebene schneidet? St. George hat auf der Grundlage dieser Konstruktion Skulpturen geschaffen, in denen Stangen mittels angebohrter Kugeln in den Eckpunkten miteinander verbunden sind.

Eine Folge mit demselben Bildungsgesetz, aber anderen Startwerten, hatte schon 1876 der französische Mathematiker Édouard Lucas (1842 bis 1891) studiert. Sein Kollege R. Perrin hat diese Ideen 1899 weiterentwickelt, und die Folge heißt heute Perrin-Folge. Die Perrin-Zahlen unterscheiden sich von den Padovan-Zahlen durch die Anfangswerte: $a_0 = 3$, $a_1 = 0$ und $a_2 = 2$. Der Quotient aufeinanderfolgender Perrin-Zahlen strebt wiederum gegen p (das gilt für beliebige Anfangswerte), aber Lucas beschrieb eine subtilere Eigenschaft: Immer wenn n eine Primzahl ist, dann ist a_n ohne Rest durch n teilbar. Beispielsweise gilt für die Primzahl 19, daß $a_{19} = 209 = 19 \times 11$ ist.

Im Umkehrschluß liefert dieser Satz einen Test dafür, ob eine gegebene Zahl zusammengesetzt ist. Für $n = 18$ etwa ergibt sich $a_{18} = 158$, und bei der Division von 158 durch 18 bleibt der Rest 14, also nicht 0. Also ist 18 zusammengesetzt. Allgemein gilt: Jede Zahl n, die a_n nicht teilt, ist zusammengesetzt.

Der Test könnte durchaus praktisch bedeutsam werden: William W. Adams und Daniel Shanks von der Universität von Maryland (Hauptsitz Adelphi) haben 1982 ein Verfahren gefunden, den Rest bei der Division von a_n durch n sehr schnell (Rechenaufwand proportional zum Logarithmus von n) zu berechnen. Wie jeder Primzahltest kann auch dieser zur Lösung des Faktorisierungsproblems beitragen, welches wiederum für Datenverschlüsselungsverfahren von Bedeutung ist (Spektrum der Wissenschaft, September 1996, Seite 80).

Wenn aber a_n durch n teilbar ist, muß dann n eine Primzahl sein? Keineswegs! Der Satz von Lucas hat in diesem Punkt dieselbe Eigenschaft wie der kleine Fermatsche Satz (Spektrum der Wissenschaft, Februar 1983, Seite 80): Man kann mit ihm die Primzahleigenschaft einer Zahl nur widerlegen, aber nicht beweisen. Aus „Wenn es regnet, dann werde ich naß" folgt nicht „Wenn ich naß werde, dann regnet es". (Ich könnte ja an einem trockenen Tag in einen Teich fallen.) Tatsächlich gibt es Perrin-Pseudoprimzahlen, also solche, die den Test bestehen und gleichwohl zusammengesetzt sind. Adams und Shanks haben 1982 als Gegenbeispiel $n = 271\,441 = 521^2$ angegeben, Jeffrey Shallit von der Universität Waterloo (Ontario, Kanada) im gleichen Jahr $n = 904\,631 = 7 \times 13 \times 9941$. Neue Ergebnisse sind willkommen; aber wer weitere Perrin-Pseudoprimzahlen finden will, muß viel Geduld und Rechenzeit aufwenden. Jedenfalls hat John P. Robertson aus Berwyn (Pennsylvania) bis 2 900 000 keine weiteren entdeckt.

Literaturhinweis

Der Goldene Schnitt. Von Albrecht Beutelspacher und Bernhard Petri. Zweite, überarbeitete und erweiterte Auflage. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 1996.

Monatsspektrum

Identifizierung eines Resistenzgens zum Schutz von Zuckerrüben gegen Fadenwürmer

In mühevoller Kleinarbeit ist es gelungen, in einer seltenen Wildpflanze ein Gen aufzuspüren und zu klonieren, das Zuckerrüben gegen einen ihrer schlimmsten Schädlinge resistent macht.

Von Christian Jung

Zu den vielen Krankheitserregern und Parasiten, welche die Zuckerrübe befallen und dadurch beträchtlichen wirtschaftlichen Schaden anrichten, gehört der Nematode *Heterodera schachtii*, ein Fadenwurm, der an den Wurzeln schmarotzt. Die Pflanze reagiert mit der Bildung eines bärtigen Wurzelgeflechts sowie mit vermindertem Wachstum. Eine Handvoll Kulturboden enthält meistens mehrere tausend Nematoden, deren Vermehrung seit dem Verbot chemischer Bekämpfungsmittel in Deutschland nur noch mit häufigem Fruchtartenwechsel oder zwischenzeitlicher Brache unterdrückt werden kann.

Diese Maßnahmen haben jedoch nur mäßigen Erfolg, weil die infektiöse Larve im Ei viele Jahre im Boden zu überdauern vermag. Erst wenn die Wurzel einer Wirtspflanze in ihrer Nähe wächst, wird sie zum Schlüpfen angeregt. Das mikroskopisch kleine Älchen dringt dann in die Wurzel ein und veranlaßt die Fusion mehrerer Zellen im Leitungsgewebe zu einem Syncytium (Bild 1), aus dem es mit einem speziellen Mundstachel Nährstoffe aufnimmt.

Beim weiteren Heranreifen differenzieren sich die Würmer in Männchen und Weibchen. Letztere schwellen stark an, lassen die Wurzelrinde platzen und strecken ihr aufgeblähtes Hinterende nach draußen, während der Kopf im Pflanzengewebe stecken bleibt. Sie werden von den inzwischen ausgewanderten Männchen befruchtet und bilden daraufhin jeweils 200 bis 500 Eier. Schließlich sterben sie ab, und ihr Körper verwandelt sich in eine stabile Dauerform, die zitronenförmige Cyste; mehrere hundert davon können an einer einzigen Pflanze entstehen. Da der gesamte Zyklus nur etwa sechs Wochen dauert, kommt es zu einer starken Vermehrung im Verlaufe einer Vegetationsperiode.

Die Situation bei der Zuckerrübe ist insofern besonders ungünstig, als es keine nematodenresistente Sorte gibt. Ein Gen, das gegen die Fadenwürmer schützt, wurde nur in der weitläufig verwandten Wildrübenart *Beta procumbens* gefunden, die auf den Kanarischen Inseln heimisch ist. Vor 17 Jahren hat man begonnen, *B. procumbens* mit Zuckerrüben zu kreuzen. Nur mit viel Aufwand ließen sich lebensfähige Bastarde gewinnen. Diese wurden mehrfach mit Zuckerrüben zurückgekreuzt, um die Gene der Wildrübe, die mit Ausnahme der Nematodenresistenz keinerlei züchterisch interessanten Eigenschaften hat, zu verdrängen. Schließlich konnten einige wenige Pflanzen selektiert werden, die zwar resistent waren, in ihrer Leistungsfähigkeit jedoch zu wünschen übrigließen.

Deshalb haben wir vor sieben Jahren damit begonnen, das Resistenzgen aus einer der Bastardlinien mit gentechnischen Methoden zu isolieren. Es mußte mühsam über seine Position im Genom eingekreist werden, weil über das zugehörige Protein nichts bekannt war. Als Ausgangspunkt diente die Beobachtung, daß die eingekreuzte Resistenz zusammen mit einem Chromosomenmarker (genauer: einem Restriktionsfragment-Längenpolymorphismus, das heißt einem charakteristischen Spaltungsmuster bei Zugabe eines bestimmten Enzyms) der Zuckerrübe vererbt wurde, der sich dicht am Ende von Chromosom 9 befindet. Dort irgendwo mußte das Resistenzgen liegen (Bild 2).

Tatsächlich befanden sich an dieser Stelle auch Marker der Wildrübe: charakteristische, als Satelliten-DNA bezeichnete Wiederholungen einer kurzen Abfolge von DNA-Bausteinen (Nucleotiden), die über das gesamte Erbgut von *B. procumbens* verstreut sind. Mit ihrer Hilfe ließ sich die Länge des fraglichen Abschnitts zu etwa 300 000 Nucleotiden bestimmen, was 0,04 Prozent der gesamten Erbinformation der Zuckerrübe entspricht. Dies erscheint zwar als wenig, doch umfaßt ein Gen im Durchschnitt nur 500 bis 4000 Nucleotide. Um in dem langen Abschnitt also das sehr viel kleinere Resistenzgen aufzufinden, spalteten wir ihn enzymatisch in Fragmente auf, welche wir zur weiteren Untersuchung in künstlichen Hefechromosomen (YACs, nach englisch *yeast artificial chromosomes*) vervielfältigten; für die einfachere Klonierung in Bakterien waren die Bruchstücke zu lang.

Anschließend machten wir uns daran, schlicht sämtliche aktiven Gene auf diesen Fragmenten zu lokalisieren – eines davon mußte schließlich das gesuchte sein. Aktive Gene zeichnen sich dadurch aus, daß sie in Boten-RNAs abgeschrieben werden, die dann als Blaupausen für den Zusammenbau der zugehörigen Proteine dienen. Wir isolierten deshalb sämtliche Boten-RNAs aus den Zellen der Bastardlinie und schrieben sie in DNA zurück. Die radioaktiv markierten DNA-Stücke dienten uns dann als Sonden für die zugehörigen Gene, da sie sich spezifisch nur mit diesen verbinden (hybridisieren) und so deren Position anzeigen. Wie sich herausstellte, lagerten sich lediglich drei dieser Sonden an die Fragmente des 300 000 Nucleotide langen Abschnitts an. Insgesamt enthielt dieses Segment also nur drei aktive Gene, während das restliche Erbmaterial offenbar aus Steuersignalen oder schlicht sinnlosen Abschnitten bestand (die mehr als 90 Prozent des gesamten Erbguts höherer Lebewesen ausmachen können).

Welches davon aber war das gesuchte Resistenzgen? Um dies herauszufinden, brachten wir die drei Sonden mit den Genomen von Wild- und Zuckerrübe zusammen. Nur eine hybridisierte ausschließlich mit *B. procumbens*. Von den drei gefundenen Genen auf dem Ende von Chromosom 9 der Bastardlinie war also lediglich eines spezifisch für die Wildrübe. Dieses mußte somit das Resistenzgen sein.

Für den letzten Beweis übertrugen wir es auf kultivierte Wurzeln einer nematodenanfälligen Zuckerrübe. Dazu schleusten wir das Gen zunächst in *Agrobacterium rhizogenes* ein und infizierten mit diesem Mikroorganismus einzelne Blätter der Rübe. Das Bakterium bewirkt zweierlei: Es injiziert die Fremd-DNA in die Pflanzenzellen und integriert sie in deren Genom; zugleich regt es die Blattzellen dazu an, binnen weniger Tage in den Kulturschalen ein üppiges Wurzelwerk zu bilden (dieser Eigenschaft verdankt es auch den Namensbestandteil *rhizogenes*, was auf Deutsch wurzelbildend heißt). Tatsächlich zeigten diese Wurzeln die gleiche Resistenzreaktion gegen die Nematoden wie die Wildrü-

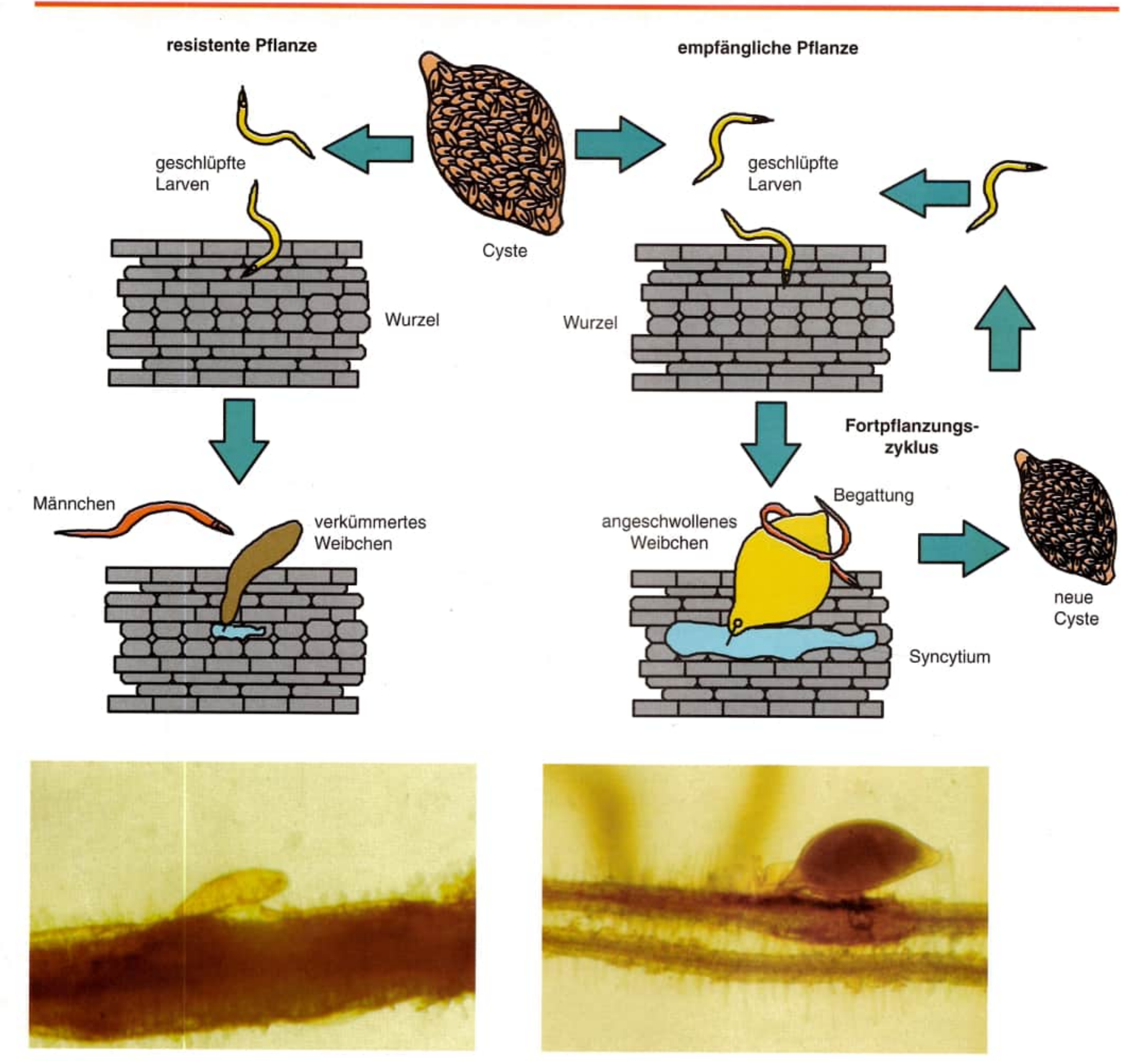


Bild 1: Der Lebenszyklus des Nematoden *Heterodera schachtii* (rechts) beginnt damit, daß frisch geschlüpfte Larven in die Wurzeln der Zuckerrübe eindringen und dort die Bildung von Nährzellen (Syncytien) induzieren. Die Weibchen schwellen stark an und strecken ihr Hinterende aus der Wurzelwand heraus. Nach der Begattung durch die beweglichen, fadenähnlichen Männchen sterben sie ab und werden zu Cysten, die prall mit Eiern gefüllt sind. In resistenten Zuckerrüben, deren Wurzeln das *Hs1*-Gen tragen, bilden sich keine normalen Syncytien (links). Dadurch verkümmern die Weibchen und entwickeln sich nicht zu Cysten.

ben, während sich die Fadenwürmer in Wurzeln, die von unveränderten *A. rhizogenes* induziert worden waren, ungehemmt vermehrten. Indem wir diesen Versuch mit Gewebekulturen durchführten, konnten wir fast zwei Jahre einsparen – so lange hätte es gedauert, komplette transgene Pflanzen zu erzeugen, anzubauen und zu testen.

Nachdem so erstmals ein Gen identifiziert worden ist, das Resistenz gegen Nematoden verleiht und das wir nach den Anfangsbuchstaben von *Heterodera schachtii Hs1* genannt haben, läßt sich die Abwehr der Schmarotzer nun auf molekularer Ebene studieren. Die Pflanzenzelle erkennt bestimmte, bisher nicht bekannte Stoffe des Nematoden. Dies löst einen Reiz aus, der über eine Signalkaskade bis an den Zellkern weitergegeben wird und dort schließlich die Aktivierung des Resistenzgens bewirkt. Einen Hinweis auf die Wirkungsweise von *Hs1* geben einige charakteristische Ähnlichkeiten zwischen dem zugehörigen Protein und den Eiweißprodukten anderer pflanzlicher Resistenzgene, von denen bekannt ist, daß sie an der Weitergabe von Signalen innerhalb der Zelle beteiligt sind, indem sie mit weiteren Proteinen in Kontakt treten. So weist es wie diese in einem bestimmten Abschnitt eine regelmäßige Abfolge der Aminosäure Leucin auf.

Die Resistenz selbst beruht darauf, daß die Nematodenlarven daran gehindert werden, ihren Lebenszyklus in der Wurzel zu vollenden. Zwar vermögen sie noch in das Gewebe einzudringen, aber es bilden sich keine ausgedehnten Syncytien (Bild 1 links). Damit können sich zwar noch Männchen, aber keine Weibchen mehr entwickeln, die höhere An-

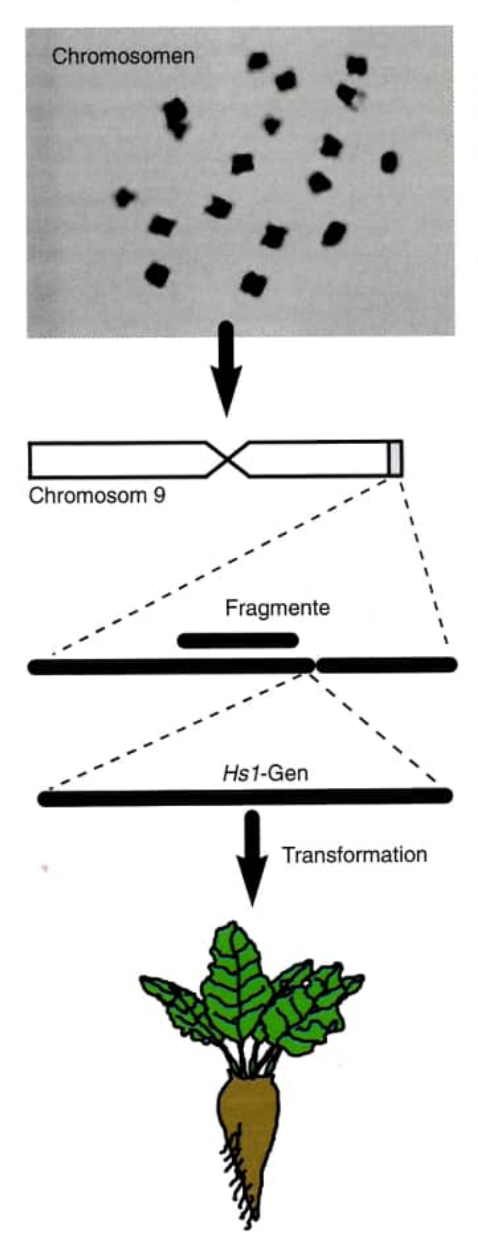


Bild 2: Stark schematische Darstellung der Vorgehensweise zur Identifizierung des Gens für Nematodenresistenz in Bastarden zwischen der Zuckerrübe und der nur weitläufig mit ihr verwandten Wildrübe *Beta procumbens*. Zunächst ließ sich das Gen grob auf das Ende von Chromosom 9 eingrenzen. Dann wurde die Erbsubstanz aus diesem Abschnitt in drei große Fragmente gespalten. Auf einem davon ließ sich schließlich das Gen ausmachen und in die Wurzeln von Zuckerrüben einschleusen.

sprüche an die Versorgung mit Nährstoffen stellen.

Nachdem das Resistenzgen bekannt und kloniert ist, kann man es auch nach einem etablierten Verfahren mittels *Agrobacterium tumefaciens* in leistungsfähige Zuckerrüben einschleusen und danach Pflanzen selektieren, die vollständig gegen den Parasiten gefeit sind. Dies bedeutet einen großen Fortschritt für die Pflanzenzüchtung. Während die Übertragung eines Gens durch Kreuzung und Selektion ebenso arbeits- wie zeitaufwendig ist und auch nach Jahrzehnten nicht unbedingt ein befriedigendes Ergebnis liefert, können nun innerhalb weniger Jahre resistente Rüben gezüchtet werden. Ihr Anbau sollte einen bedeutenden wirtschaftlichen Nutzen bringen.

Prof. Dr. Jung ist Inhaber des Lehrstuhls für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung an der Universität Kiel.

Blinkendes Quallenprotein läßt Mäuse und Forscheraugen leuchten

In immer mehr Laboratorien rund um den Globus erstrahlen Mikroben, Pflanzen und Tiere in zartem Grün. Ursache ist ein fluoreszierendes Protein, mit dem sich die Aktivität von Genen denkbar einfach nachweisen läßt. Nach jüngsten Untersuchungen glänzt der nützliche Marker aber auch durch eine ausnehmend ansprechende Struktur sowie durch die ungewöhnliche Fähigkeit zu blinken.

Von Michael Groß

Anfang 1994 stellten Molekularbiologen fest, daß sich das grün fluoreszierende Protein (GFP) der Qualle *Aequorea victoria* ideal als molekulares Etikett eignet. Will man ein beliebiges Stück Erbsubstanz auf ein Lebewesen übertragen und anschließend leicht überprüfen können, ob der Transfer geklappt hat, braucht man es nur mit dem Gen für GFP zu koppeln; grünes Leuchten beim Betrachten der manipulierten Zellen unter einer UV-Lampe dokumentiert den Erfolg (Spektrum der Wissenschaft Mai 1995, Seiten 30 bis 34). Wegen dieser einfachen Handhabung konnte sich das Quallenprotein, das seit 1995 auch als Fertig-Bausatz kommerziell erhältlich ist, in kürzester Zeit als Genmarker in der molekularbiologischen Praxis etablieren.

Beschränkte sich das Einsatzgebiet zunächst auf Einzeller und Bakterien, so haben Wissenschaftler inzwischen selbst komplette Pflanzen und Tiere mit GFP zum Leuchten gebracht. So versahen Karl J. Oparka und seine Mitarbeiter am Scottish Crop Research Institute in Dundee Pflanzenviren mit dem GFP-Genmarker, um genau verfolgen zu können, wie sich der Erreger in befallenen Gewächsen ausbreitet. Ebenso leicht läßt sich an den transgenen Pflanzen untersuchen, welche Faktoren die Vermehrung des Virus beeinflussen.

Auch in Tieren funktioniert das Leuchtphänomen. Schon 1994 ließ sich das GFP-Gen in Taufliegen und 1995 in Zebrafische einbringen. Mit einer verstärkt leuchtenden Mutante konnten Masaru Okabe und seine Mitarbeiter an der Universität von Osaka (Japan) jetzt auch Mäuse erzeugen, die als erste Säugetiere überhaupt unter der UV-Lampe durch und durch in einem gespenstischen Glibbergrün erstrahlen (Bild 1). Die Forscher hatten das Gen in befruchtete Eizellen eingeschleust. Dadurch war es in alle ausgereiften Körperzellen gelangt und sogar an die nächste Mäusegeneration weitervererbt worden. Fernziel solcher Arbeiten ist es, Grundfragen der Embryonalentwicklung zu klären.

Aber auch in der medizinischen Forschung wurde die Leuchterscheinung bereits nutzbringend eingesetzt. Beispielsweise diente sie dazu, die Ausbreitung metastasierender Krebszellen zu beobachten. Außerdem wurde GFP bei Versuchen zur Gentherapie von Tumoren in Zellkultur als Marker verwendet. Dabei ging es um die Frage, ob sich ein bestimmtes Retrovirus als spezifischer Überträger fremden Erbmaterials in Krebszellen eignet. Tatsächlich gelang es, eine an typische menschliche Erbfaktoren angeglichene Variante des GFP-Gens derart in kultivierte Hautkrebszellen aus menschlichen Melanomen einzubauen, daß sie dort auf Dauer aktiv war und auch an die Tochterzellen weitergegeben wurde.

Immer kompliziertere molekulare Werkzeuge und Sonden werden aus dem vielseitigen Leuchtprotein gebastelt. Im jüngsten Beispiel haben Atsushi Miyawaki und seine Mitarbeiter an der Universität von Kalifornien in San Diego zwei verschiedenfarbige Varianten in einem Konstrukt vereint: Sie umrahmen eine

 (Seiten 17 bis 21: Anzeige und Beihefter)

Der Spektrum⁺ Club

Mehr Spaß, mehr Nutzen und mehr Vorteile für Sie.

Vom dekorativen Gag über qualifizierten Lesestoff bis zu intelligenten Spielen und pragmatischen Dienstleistungen – keines der **Spektrum⁺ Exklusiv-Angebote** für unsere Abonnenten finden Sie in gleicher Ausstattung oder zum gleichen Preis im Handel.



Der **Mondphasenkalender** zeigt für jeden Tag und Monat an, in welcher Phase der Mond sich befindet. Der Kalender ist künstlerisch gestaltetet und per Hand gedruckt; **Spektrum⁺ Club Preis DM 149,–.**

Lunaphase zeigt die dem Menschen sichtbare Mondvorderseite mit allen geographischen Details sowie den Landeplätzen der wichtigsten Mondflüge. Eine patentierte Lichtprojektion stellt in stufenlosem Ablauf die jeweilige aktuelle Mondphase dar. Das Gehäuse, aus einer hochwertigen Aluminium-Magnesium-Legierung im Sandgußverfahren gefertigt, wird in Handarbeit geschliffen und poliert (Maße 39 × 28 × 16 cm); **Spektrum⁺ Club Preis DM 798,–.**



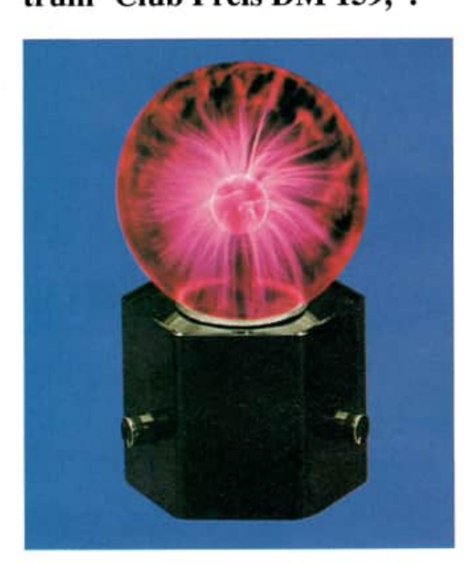


Das **Columbus Art Line Planetarium** ist ein physikalisches Modell einer imaginären Himmelskugel (dargestellt durch den äußeren transparenten Globus) mit der Erde im Zentrum. Die Transparenz erlaubt Ihnen, durch die Oberfläche des Himmelskörpers auf die gegenüberliegende Seite zu blicken und dabei die Sterne und Konstellationen richtig positioniert in ihrem Verhältnis zueinander zu betrachten. Der innere Erdglobus zeigt Ihnen deutlich die Kontinente, Ozeane und eine Anzahl von Großstädten. Ein vollständiges Gradnetz ermöglicht Ihnen, die Position jeder gewünschten Stadt zu bestimmen. Das Planetarium wird in aufwendigen Schritten aus Acrylglas handgefertigt (Ø 40 cm); **Spektrum⁺ Club Preis DM 998,–.**

Die kardanische **Tischleuchte „Kopenhagen“** ist ein gelungenes Beispiel für die Verbindung von elegantem skandinavischem Design und ausgeklügelter Technik. Massives Messing, Höhenverstellbar von 21 bis 28 cm; Petroleumbetrieb; **Spektrum^{+} Club Preis DM 159,–.**



Das Innere des **Nebula Ball** strahlt Energie in eine mit Edelgas gefüllte Kugel ab, wodurch Lichtblitze entstehen. Beim Berühren der Kugel ändert sich das Energiefeld und das Leuchten verstärkt sich. Durchmesser 20 cm, Stromversorgung 12 V DC, Lieferung mit Netzadapter 230 V, Anleitung in Englisch; **Spektrum^{+} Club Preis DM 159,–.**





Nach dem menschlichen Körper war das Pferd das zweite Hauptstudienobjekt von Malern und Bildhauern der Renaissance. Um ein Pferd malen oder formen zu können, mußten sie zunächst die Anatomie studieren. Aus diesen Grundlagenstudien entstanden Modelle aus Holz mit flexiblen Gelenken. Das **Renaissance-Pferd** hat eine Länge von 35 cm und wird in einer dekorativen Geschenkverpackung geliefert; **Spektrum^{+} Club Preis DM 119,–.**



Vor 65 Millionen Jahren starben die Ammoniten aus. Dem zur Gattung der Douvilleiceras gehörenden Kopffüßer diente das dünne, jedoch rauhe und stark skulptierte Gehäuse weniger als Schmuck, sondern bot Schutz vor schalenknackenden Räubern. Der **Ammonit** ist aus 925 Sterlingsilber und hat eine Größe von etwa 4 cm. Er kann als **Lesezeichen** verwendet werden; **Spektrum^{+} Club Preis DM 39,–.**



Im Juli 1997 landete zum ersten Mal seit 21 Jahren wieder eine Sonde auf unserem Nachbarplaneten. Mit an Bord war ein mobiler Roboter. Auf der **Uhr Mars** „rast“ Pathfinder (auf der Sekundenscheibe) durch die Geröllwüste. Kunststoffuhr mit Edelstahlboden, wasserdicht bis 3 ATM, Schweizer Qualitätsquarzwerk; **Spektrum^{+} Club Preis DM 89,–.**

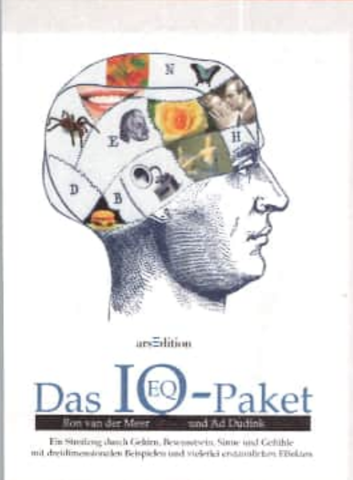


Nostalgisch schön ist das **Kerzenboot** aus Blech, das in Handarbeit gefertigt wurde. Sie erhalten es im **Spektrum^{+} Club** für **DM 19,80.**

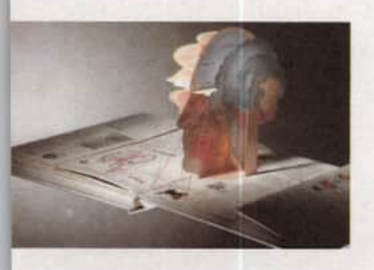
Der Spektrum⁺ Club



Wandleuchte **Copyright** (230 V/max. 25 W, 30 x 30 cm) **DM 149,–** (Copylight mit Folie). Die Folie **„Three Symbols of Newton“** gibt es auch einzeln für **DM 49,–.**



Das IQ/EQ-Paket
Eine Reise durch das menschliche Gehirn. Dreidimensionale Bilder und verblüffende Effekte eröffnen einen völlig neuen Zugang zu einem hochaktuellen Thema. Multimediales Kombipack bestehend aus Tonkassette, Konzentrationsspielen und einem weiterführenden Verzeichnis; **DM 79,-** bis 31.03.98, danach DM 98,-.





Der Spektrum⁺ Club

Ich möchte von dem **Spektrum⁺ Angebot** Gebrauch machen und bestelle hiermit gegen Rechnung

❍ **Columbus Art Line Planetarium**	DM 998,–
❍ **Lunaphase**	DM 798,–
❍ **Mondphasenkalender**	DM 149,–
❍ **Rodgers Connection**	DM 69,–
❍ **Uhr „Mars“**	DM 89,–
❍ **Kerzenboot**	DM 19,80
❍ **Lesezeichen Ammonit**	DM 39,–
❍ **Tischleuchte Earth**	DM 179,–
❍ **Laserpointer Lagune**	DM 80,–
❍ **Laserpointer Klassik**	DM 165,–
❍ **Pointer's LAB**	DM 89,–
❍ **Nebula Ball**	DM 159,–
❍ **Tischleuchte „Kopenhagen“**	DM 159,–
❍ **Renaissance-Pferd**	DM 119,–
❍ **Armbanduhr Pioneer 11**	DM 84,–
❍ **Copylight mit Folie „Newton“**	DM 149,–
❍ **Folie „Newton“**	DM 49,–
❍ **Rätselbuch „König Arcus“**	DM 16,80
❍ **Gewonnen, Herr Euler** (Tafel)	DM 179,–

Preise zzgl. Versandkosten

Informationen zu den nicht im Heft beschriebenen Produkten finden Sie im Internet: http://www.spektrum.de

Name/Vorname

Straße/Nr.

PLZ/Wohnort

Datum/Unterschrift

Kunden-Nr. laut Jahresrechnung, Versandanschrift oder Spektrum⁺ Clubkarte:

❍ Bitte senden Sie mir nachfolgend angekreuzte Dossierausgaben zum Preis von je DM 16,80 zzgl. Versand:

❍ Zukunft im Netz
❍ Kopf oder Computer
❍ Seuchen
❍ Welternährung
❍ Klima und Energie
❍ Dritte Welt
❍ Datenautobahn
❍ Radioaktivität
❍ Mikrosystemtechnik
❍ Verkehr und Auto

❍ **Ich bestelle die Sonderheftreihe Spektrum Dossier im Abonnement** zum Jahresbezugspreis (4 Ausgaben) von DM 55,20 frei Haus; für Studenten und Schüler DM 48,–. Bei Versand ins Ausland werden die Porto-Mehrkosten berechnet. Als erste Ausgabe erhalte ich „Zukunft im Netz“ (ET Januar 1998).

Name/Vorname

Straße/Nr.

PLZ/Ort

Datum Unterschrift

577709

Widerrufsrecht: Ich habe das Recht, diese Bestellung innerhalb von 10 Tagen schriftlich bei Spektrum der Wissenschaft, Vangerowstr. 20, D-69115 Heidelberg, zu widerrufen und bestätige dies durch meine 2. Unterschrift.

Datum 2. Unterschrift

Ja, ich bestelle gegen Rechnung:

Spektrum-Spezial **je DM 16,80**
❍ Pharmaforschung ❍ Krebsmedizin
❍ Das Immunsystem ❍ Leben und Kosmos
❍ Schlüsseltechnologien (DM 18,80)

Spektrum-Digest **je DM 16,80**
❍ Gene und Genome
❍ Saurier ❍ Astrophysik
❍ Moderne Werkstoffe ❍ Moderne Chemie

JAHRESREGISTER

❍ Update Lars 1996	DM 20,–
❍ Update 1996 Ascii ❍ DOS ❍ MAC	DM 20,–
❍ Windows Register 1978-1996	DM 80,–
❍ **Musikprogramm „Virtual Wave“**	DM369,–
❍ **Musikprogramm „Micro Logic“**	DM149,–
❍ **FAST PLATONISCHE KÖRPER**	DM 19,80
❍ **PAPIERMECHANIK: UP-POP**	DM 19,80
❍ **PAPIERMECHANIK: POP UP**	DM 19,80
❍ **OPTICAL DESIGN**	DM 19,80
❍ **FALTPUZZLE (Heft)**	DM 11,50
❍ **SAMMELKASSETTE**	DM 16,50
❍ **TRIADIS**	DM 19,80
❍ **BRAINTWISTER (Spiel)**	DM 39,–
❍ **CREATURE STAND-UP** (ca. 290 × 210 mm)	DM 19,80
❍ **Poster „Hale-Bopp“**	DM 19,–

T-SHIRTS (je DM 29,–)
❍ **Apfelmann** ❍ **Muskelmann** ❍ **Creatures**
❍ **Pioneer 11** ❍ **Mathematiker**
❍ **IQ/EQ-PAKET** (bis 31.03.98, danach DM 98,-) DM 79,–

PUZZLES je DM 39,80
❍ **Apfelmann** ❍ **Kristall**
❍ **Eruption** ❍ **Tiefenrausch**

CD-ROM

❍ **Streifzüge durch die Musikgeschichte** (bis 30.11.97, danach DM 69,-)	DM 59,–
❍ **Edison der Zauberer von Menlo Park** (bis 30.11.97, danach DM 89,-)	DM 99,–
❍ **Ozean – Ursprung des Lebens**	DM 99,–
❍ **Red Shift 2**	DM 149,–
❍ **Der Mensch**	DM 79,–
❍ **Der Kosmos**	DM 79,–
❍ **Leben im Universum**	DM 89,–
❍ **Evolution**	DM 79,–
❍ **Steinzeit bis Internet**	DM 49,–
❍ **Das Wetter**	DM 69,–
❍ **Abenteuer Seidenstraße**	DM 79,–
❍ **Sofies Welt**	DM 99,–
❍ **3D Atlas**	DM 89,–
❍ **Organic Art**	DM 69,–
❍ **Creatures** ❍ **Win'95** ❍ **Mac**	DM 49,–
❍ **Escher** DM 78,–	
❍ **Einstein** DM 89,– ❍ **Planeten**	DM 79,–
❍ **Bauen im Licht** DM 39,– ❍ **IQ 130**	DM 49,–



Armbanduhr „Pioneer 11“ DM 84,–

Bitte frankieren, falls Marke zur Hand

Antwort

An
Spektrum⁺Club
c/o Spektrum der Wissenschaft
Vangerowstraße 20

D-69115 Heidelberg

Produktideen

Wir interessieren uns für **Anregungen** aus dem Kreis unserer Leser für den **Spektrum⁺Club.**

Jede Produktidee, die wir realisieren, **honorieren wir** dem Urheber **mit DM 500,-** gegen Übertragung des Nutzungsrechtes. Bei mehreren identischen Vorschlägen wird das Honorar geteilt.

Wenn Sie mitmachen wollen wenden Sie sich an:

Spektrum⁺Club, c/o
Spektrum der Wissenschaft
Vangerowstraße 20
69115 Heidelberg;
Telefon (0 62 21) 50 47 47;
e-mail:marketing@spektrum.com
http://www.spektrum.de



Bitte frankieren, falls Marke zur Hand

Antwort

SPEKTRUM
DER WISSENSCHAFT
Leser-Service
Vangerowstraße 20

D-69115 Heidelberg

Widerrufsrecht:

Diese Bestellung kann innerhalb von 10 Tagen schriftlich bei Spektrum der Wissenschaft, Vangerowstraße 20, D-69115 Heidelberg, widerrufen werden. Zur Fristwahrung genügt die rechtzeitige Absendung.

Zu Ihrer Erinnerung:
Ich habe am

____

Spektrum der Wissenschaft bestellt.

Absender:

____
Name/Vorname

____
Straße/Nr.

____
PLZ/Wohnort

✘
____
Datum Unterschrift

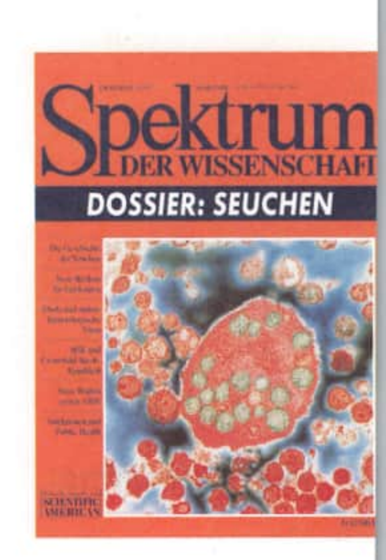
Preise zzgl. Versandkosten

Bitte frankieren, falls Marke zur Hand

Antwort

SPEKTRUM
DER WISSENSCHAFT
Leser-Service
Vangerowstraße 20

D-69115 Heidelberg



Calcium bindende Einheit aus dem Protein Calmodulin und dem Peptid M13. Sobald sich ein Calcium-Ion an das Calmodulin anlagert, ändert sich die Geometrie des gesamten Gebildes so, daß die kurzwelliger absorbierende GFP-Variante die aufgenommene Lichtenergie an das andere GFP weiterreicht, so daß dieses in seiner charakteristischen Farbe fluoresziert. Damit verfügt man über eine hochempfindliche Meßsonde, mit der sich noch geringste Calciummengen (bis zu einem hundertmillionstel Mol pro Liter) mit einer so hohen räumlichen Auflösung bestimmen lassen, daß es gelingt, die Konzentration im Cytosol (der Zellflüssigkeit) mit der in verschiedenen Organellen zu vergleichen. In anderen Experimenten bauten die Forscher die verschiedenfarbigen GFPs in getrennte Proteine ein und konnten auf analoge Weise die Wechselwirkung zwischen den Eiweißstoffen in der Zelle untersuchen.

Hilfreich beim Konstruieren derart komplizierter GFP-Varianten ist die Kenntnis der dreidimensionalen Struktur des Quallenproteins. Zwei Arbeitsgruppen konnten vor gut einem Jahr unabhängig voneinander zeigen, daß es sich um ein recht ausgefallenes und zugleich ästhetisch sehr reizvolles Gebilde handelt. Die äußere Hülle ist ein perfekt symmetrisches, erstaunlich großes Faß aus elf Strängen einer Beta-Faltblatt-Struktur, auf dessen Stirnseiten – gleichsam als Deckel – kurze helikal gewundene Abschnitte sitzen (Bild 2). Im Inneren des Hohlraums windet sich eine weitere, längere Helix um die Faßachse, und genau in deren Mitte befindet sich – wie der Wolframdraht in der Glühbirne – der leuchtende Teil des Moleküls (das Chromophor), der durch eine ungewöhnliche Reaktion zwischen benachbarten Aminosäurebausteinen entsteht.

Aus der Kenntnis dieser Struktur heraus läßt sich nun besser verstehen oder vorhersagen, wie sich der Austausch einzelner Aminosäurebausteine auf die Leuchterscheinung auswirkt. Das natürliche Quallenprotein absorbiert am besten bei etwa 396 Nanometern (an der Grenze zwischen Violett und nahem Ultraviolett), weist aber ein zweites Absorptionsmaximum bei 476 Nanometern (im blaugrünen Spektralbereich) auf. Man weiß inzwischen, daß die kurzwelligere Absorptionsbande auf den elektrisch neutralen Zustand des Chromophors zurückgeht, während die langwelligere nur auftritt, wenn der leuchtende Molekülteil eine negative Ladung trägt. Durch subtile Veränderungen derjenigen Aminosäurebausteine, die dem Chromophor hinreichend nahe kommen, um seinen Ladungszustand zu beeinflussen, können Forscher nun GFP-Varianten mit maßgeschneiderten optischen Eigenschaften erzeugen. Eine stärkere Energieaufnahme bei etwa 480 Nanometern ist zum Beispiel aus praktischen Gründen wünschenswert; denn für diesen Wellenlängenbereich gibt es Laser, die ihre Energie mit großer räumlicher und zeitlicher Präzision an das Protein abgeben können.

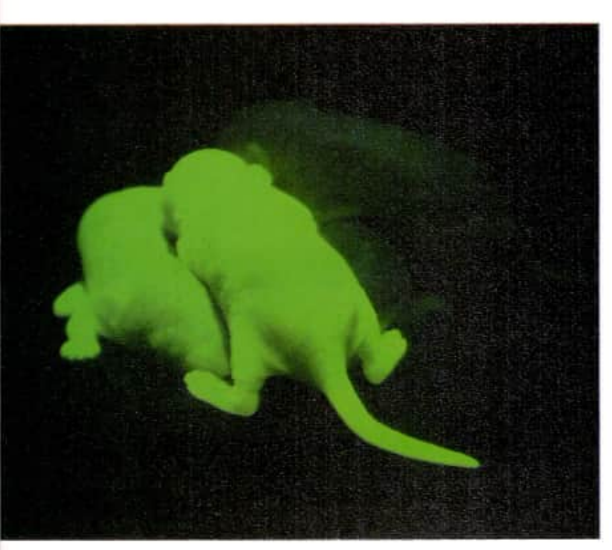


Bild 1: Während die frisch geworfenen nackten Mäusejungen im Tageslicht normal und alle gleich aussehen (oben), erscheinen die beiden Tiere, denen ein GFP-Gen eingepflanzt wurde, bei Ultraviolett-Bestrahlung in leuchtendem Grün (unten).

Trotz aller Fortschritte im theoretischen Verständnis des Fluoreszenzvorgangs beim GFP kam allerdings die Entdeckung, daß das Licht unter Umständen nicht gleichmäßig, sondern in Form diskreter Blitze abgestrahlt wird, völlig überraschend („Nature", Band 388, Seiten 355 bis 358, 24. Juli 1997). William E. Moerner und seine Mitarbeiter an der Universität von Kalifornien in San Diego wollten an zwei GFP-Varianten mit negativ geladenem Chromophor, die bevorzugt im blaugrünen Bereich absorbieren, die fluoreszierenden Moleküle einzeln untersuchen. Dazu verteilten sie die Proteine sehr weiträumig in einem porösen Gel (einer Art Wackelpudding mit sehr kleinen Luftlöchern), so daß sie sich nicht mehr vom Fleck rühren konnten, aber immer noch für Licht und Chemikalien zugänglich waren. Die so eingefangenen Proteinmoleküle bestrahlten die Wissenschaftler mit Licht von 488 Nanometern Wellenlänge und filmten durch ein Mikroskop ihr Leuchten. Dabei konnten sie die Lichtemission einzelner GFP-Moleküle getrennt aufzeichnen, weil deren durchschnittlicher Abstand im Gel wesentlich größer war als die Auflösung des Mikroskops (250 Nanometer).

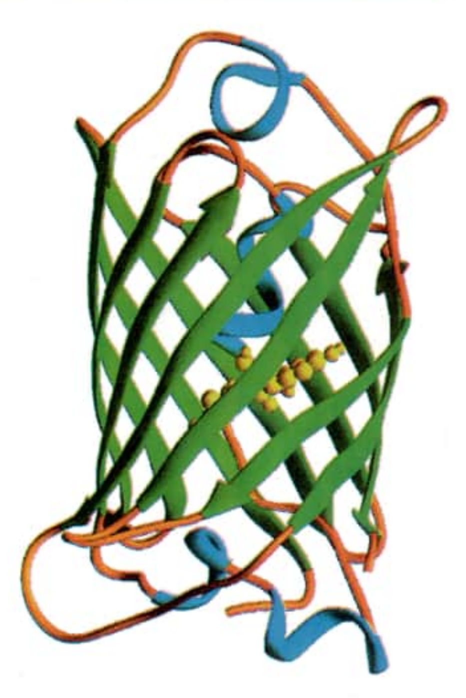


Bild 2: Raumstruktur des grün fluoreszierenden Proteins GFP aus der Qualle *Aequorea victoria*. Elf Stränge eines Beta-Faltblatts (grüne Pfeile) sind zu einer Art Faß aufgerollt, zu dem die teilweise helikalen (blau) Verbindungsstücke Boden und Deckel beitragen. Am Ende eines weiteren helikalen Abschnitts im Inneren des Fasses befindet sich das für die Fluoreszenz verantwortliche Chromophor, dessen wichtigste Atome als gelbe Kugeln dargestellt sind.

Verblüfft stellten Moerner und seine Mitarbeiter fest, daß jedes einzelne Molekül jeweils nur einige Sekunden lang fluoreszierte und dann für einige Sekunden erlosch, ehe es wiederum aufleuchtete. Dieser Wechsel zwischen hell und dunkel hielt – mit statistischen Schwankungen, aber im Mittel gleichbleibender Frequenz – für einige Minuten an, bis die

1000 DM zu gewinnen

Wer ist die Schönste im ganzen Land? Die Durchschnittlichste, ist das ernüchternde Ergebnis mancher psychologischen Tests (Spektrum der Wissenschaft, Juli 1990, Seite 24). Gelegentlich kommt es jedoch darauf an, sich vom Durchschnitt abzusetzen – und zwar genau um das richtige Maß.

In dem fernen Lande Haarien messen die Menschen Schönheit allein an der Haarlänge. Idealerweise sollte sie genau 2/3 des Durchschnittswertes betragen. Die Bewerber um den alljährlichen Schönheitspreis begeben sich rechtzeitig vor dem Wettstreit in Klausur, so daß niemand über ihre Haarlänge etwas in Erfahrung bringen kann – auch die anderen Teilnehmer nicht. Erst wenn alle auf der Bühne stehen, werden die Haare vermessen; gewonnen hat die Person, deren Haarlänge zwei Dritteln des Durchschnitts der Teilnehmer am nächsten kommt.

Reinhard Selten, emeritierter Professor für Wirtschaftstheorie an der Universität Bonn und Nobelpreisträger 1994 für Wirtschaftswissenschaften (Spektrum der Wissenschaft, Dezember 1994, Seite 25), und Rosemarie Nagel, Profesor Visitante am Institut für Wirtschaftswissenschaften der Universität Pompeu Fabra in Barcelona, laden Sie ein, an einem Spiel teilzunehmen, das Sie in eine ähnliche Situation versetzt wie die Teilnehmer des Schönheitswettbewerbs von Haarien:

Wählen Sie eine Zahl von 0 bis 100 einschließlich; nicht-ganze Zahlen sind zugelassen. Senden Sie diese Zahl mitsamt Ihrer Adresse mit der Post an Spektrum der Wissenschaft, Leserservice, Vangerowstraße 20, D-69115 Heidelberg, oder per e-mail an haarlang@spektrum.com. Einsendeschluß ist Montag, der 17. November 1997 (Posteingang).

Es wird der Durchschnitt aller eingesandten Zahlen berechnet; 2/3 dieses Durchschnitts nennen wir die Zielzahl. Spektrum der Wissenschaft zahlt 1000 DM an denjenigen, dessen Zahl der Zielzahl am nächsten kommt. Bei mehreren gleich optimalen Einsendungen entscheidet das Los. Der Rechtsweg ist ausgeschlossen.

Jeder Teilnehmer darf nur eine Zahl einreichen. Wer mehrere Zahlen einschickt, wird nicht berücksichtigt, weder bei der Ermittlung des Gewinners noch bei der Berechnung des Durchschnitts. Mitarbeiter von Spektrum der Wissenschaft und ihre Angehörigen dürfen nicht teilnehmen.

Wir würden uns freuen, wenn Sie uns außerdem mitteilten, wie Sie zu Ihrer Wahl gekommen sind.

Reinhard Selten und Rosemarie Nagel werden im Februar 1998 in einem Monatsspektrum-Artikel den Gewinner bekanntgeben, die Ergebnisse auswerten und den wissenschaftlichen Hintergrund des Spiels beleuchten. Dabei wird auch Gelegenheit sein, auf einige Kommentare von Einsendern näher einzugehen.

Moleküle nach Aussendung von etwa einer Million Lichtquanten (Photonen) gewissermaßen erschöpft waren und ihr Leuchten auf Dauer einstellten. Allerdings ließen sie sich regenerieren, wenn sie etwa fünf Minuten lang mit energiereicherem violetten Licht bestrahlt wurden. Danach durchliefen sie den Blink-Zyklus wie zuvor.

Wirklich erklären läßt sich das Phänomen bisher nicht; man kann nur gewisse Vermutungen darüber anstellen. Offensichtlich müssen mindestens drei relativ stabile Zustände daran beteiligt sein. Zu Beginn und während der Fluoreszenz befindet sich das Molekül im energetisch günstigsten, anionischen (negativ geladenen) Zustand, in dem es das auftreffende Licht der Wellenlänge 488 Nanometer absorbiert und im grünen Spektralbereich wieder abstrahlt. Bei dem erschöpften Zustand, in dem das Leuchten völlig aufgehört hat, dürfte es sich dagegen um die neutrale Form des Chromophors handeln, die das eingestrahlte blaugrüne Licht gar nicht mehr absorbiert. Dafür spricht, daß sich das Protein mit violettem Licht regenerieren läßt, dessen Wellenlänge nahe am Absorptionsmaximum des neutralen Chromophors liegt. Durch die fortgesetzte Aufnahme und Abgabe von elektromagnetischer Strahlung, von der ein Teil jeweils in Wärme umgesetzt wird, gewinnt das zunächst negativ geladene Chromophor möglicherweise genügend Energie, um ein Elektron abzugeben und in die relativ hochenergetische neutrale Form überzugehen.

Am spekulativsten bleiben die Vermutungen über den dritten Zustand, den das Molekül in den kurzen Dunkelphasen während des Blinkens einnimmt. Vorerst läßt sich nicht viel mehr darüber sagen, als daß er energetisch wohl nur wenig über dem Grundzustand liegt, so daß leicht ein spontaner Wechsel zwischen beiden stattfinden kann.

Möglicherweise läßt sich das Blinken auch praktisch verwerten. Bei der von Moerner untersuchten GFP-Variante handelt es sich vermutlich um das erste molekular-optische System, das bei Raumtemperatur zwischen zwei Zuständen umgeschaltet werden kann. Ein Molekül, das auf eine kurze Bestrahlung bei 488 Nanometern mit pulsierender Fluoreszenz reagiert, könnte demnach etwa die binäre Ziffer 1 codieren, während eines, das sich im dauerhaft dunklen Zustand befindet, die 0 repräsentiert. Durch längeres Bestrahlen mit blaugrünem beziehungsweise violettem Licht ließen sich die beiden Ziffern ineinander umwandeln. Schaltgeschwindigkeiten von mehreren Minuten wären allerdings völlig inakzeptabel.

Ob Biophysik, Medizin, Entwicklungsbiologie oder Molekularbiologie – es gibt kaum einen Bereich der *Life Sciences*, in dem das grüne Leuchten noch nicht erstrahlt ist. GFP dient als Modellsubstrat für molekulare Chaperone ebenso wie als Sonde zur Messung der Viskosität des Cytoplasmas oder als Leuchtspur, anhand derer sich Transportwege innerhalb der Zelle verfolgen lassen. Noch bemerkenswerter als die rapide steigende Zahl der Einsatzmöglichkeiten von GFP ist dieser außerordentlich weit gespannte Bogen seiner Erforschung und Anwendung. Sein grünes Licht scheint in vieler Hinsicht ein Startsignal zu sein.

Dr. Groß forscht als David Phillips Research Fellow am Oxford Centre for Molecular Sciences in England über die Faltung von Proteinen.

Hunde fast so alt wie der moderne *Homo sapiens*?

Eine genetische Studie bestätigt, daß der Haushund nur Wölfe als Vorfahren hat. Überraschend ist dagegen der Befund, daß der treueste Freund des Menschen offenbar wesentlich früher domestiziert wurde als bisher angenommen.

Von Adelheid Stahnke

Der Hund ist eines der ältesten Haustiere und wurde nach bisherigen Vorstellungen vor rund 10 000 bis 15 000 Jahren zum Gefährten des Menschen. Zumindest gibt es aus dieser Zeit erstmals Fossilien, die bereits deutlich anders aussehen als Knochen und Zähne von Wölfen. Und da die frühesten solchen Funde aus jenen Regionen im südwestlichen Asien stammen, wo damals die seßhafte Lebensweise aufkam, nimmt man an, daß die Domestikation des Hundes erst stattfand, als Äcker, feste Wohnstätten und Viehherden zu behüten waren.

Wenig später tauchten Haushunde auch in anderen Regionen der Welt auf, beispielsweise in Nordeuropa und in Amerika. Wegen der selbst für ein Haustier ungewöhnlichen Vielfalt an Formen und Rassen war die Abstammung lange unsicher. So vermuteten manche Wissenschaftler, daß außer dem Wolf auch Schakale oder in Amerika Kojoten ihr Erbgut beigemischt haben könnten. Dem widersprechen allerdings anatomische Vergleiche aus neuerer Zeit.

Eine andere umstrittene Frage ist, was einst die treibende Kraft dafür war, daß Wölfe genetisch, körperlich und im Verhalten zu handhabbaren, gefügigen Hausgenossen wurden. Die meisten anderen Arten scheint der Mensch selbst durch Zucht und Auslese seinen Zwekken allmählich dienstbar gemacht, sie sozusagen in sein Hauseigentum überführt zu haben (gemäß dem spätlateinischen *domesticatio*); und so könnte es durchaus sein, daß er auch Wolfswelpen aufzog, zähmte und später weiterzüchtete. Doch genausogut wäre denkbar, daß Wölfe von allein Anschluß an menschliche Horden und Siedlungen suchten – vielleicht weil sie dort Futter fanden – und daß die am wenigsten schreckhaften und vorsichtigen Tiere, die in dieser Umwelt am leichtesten zurechtkamen, sich an den neuen Lebensraum anpaßten.

Schließlich ist nicht klar, ob die Domestikation des Hundes ein einziges Mal stattfand oder mehrfach zu verschiedenen Zeiten und in verschiedenen Regionen, und ob sich auch später vielleicht noch manchmal Wölfe eingekreuzt haben oder absichtlich eingekreuzt wurden.

Vor allem diesen beiden Fragen galt eine umfangreiche genetische Studie, deren teils verblüffende weitere Ergebnisse kürzlich in der Wissenschaftszeitschrift „Science" veröffentlicht wurden (Band 276, Seite 1687). Gemeinsam mit ihren Mitarbeitern haben Charles Vilà und Robert K. Wayne von der Universität von Kalifornien in Los Angeles aus Haar-, Gewebe- und Blutproben von je rund 150 Wölfen und Hunden anhand einer kurzen

Erbsequenz Verwandtschafts- und Abstammungsverhältnisse erschlossen.

Genetische Promenadenmischungen

Wie erwartet, fanden sich tatsächlich keine Anzeichen für eine andere Abstammung des Hundes als vom Wolf. Überraschender ist aber der Stammbaum selbst. Die genetischen Proben stammten von Wolfspopulationen aus der ganzen Welt (Wölfe sind – beziehungsweise waren – über fast ganz Eurasien und Nordamerika verbreitet) sowie von 67 der rund 400 heutigen Hunderassen und -zuchtlinien, darunter so alten wie den australischen Dingos, die praktisch fast wilde Hunde sind, oder von afrikanischen und indianischen Zuchten.

Demzufolge hat offenbar zwar einst zweimal eine Domestikation unabhängig voneinander in verschiedenen Regionen mit Wölfen getrennter Populationen stattgefunden. Die eine dieser beiden Linien scheint sich aber unter heutigen Hunden kaum durchgeprägt zu haben. Somit gehen die meisten unserer bellenden Hausgenossen wie auch die Dingos auf eine einzelne, sehr alte Linie zurück, die sich sehr früh von einer bestimmten Wolfspopulation abgespalten haben muß. In vielen Hunderassen finden sich allerdings auch Anzeichen für nachträgliche Einkreuzungen von Wölfen in genetisch schon veränderte Linien. Bei Deutschen Schäferhunden beispielsweise gab es Hinweise auf eine nähere Wolfsverwandtschaft, aber unter anderem auch bei Zwergpudeln. Solche späteren Einträge genetischen Materials, das vor allem aus Südosteuropa zu stammen scheint, könnten nach Ansicht der amerikanischen Forscher den Genpool des Haushunds vergrößert und zu seiner heutigen Vielfalt beigetragen haben.

Die verglichene Erbsequenz trat bei den Wolfspopulationen in 27 Varianten auf. Auch die Hunde zeigten eine große Variationsbreite: Bei ihnen fanden die Forscher von dem betreffenden Erbabschnitt immerhin 26 verschiedene Typen – eine erstaunlich hohe Zahl für ein Haustier; denn an sich fördert die gezielte Inzucht den Domestikationsprozeß. Insgesamt betrachtet, waren die Varianten der Hunde jedoch deutlich verschieden von denen der Wölfe.

Hinzu kommt ein weiterer wichtiger Unterschied. Während sich bei den Wölfen die 27 Varianten gut den einzelnen Verbreitungsgebieten zuordnen ließen, also die regionale Verteilung widerspiegelten, sortierten sich die 26 Typen der Hunde keineswegs nach ähnlichen oder mutmaßlich nahe verwandten Rassen, sondern waren bunt gemischt. So hatten manche Tiere aus hochmodernen Zuchtlinien den gleichen Typ geerbt wie einige uralte; ein Husky – ein sibirischer Schlittenhund – etwa wies dieselbe Sequenz auf wie Dingos. Eine andere Variante kam sowohl beim Deutschen Schäferhund und beim Riesenschnauzer als auch bei Terriern und beim Papillon vor, einem aus Zwergspaniels gezüchteten Schoßhund. Bezüglich des betrachteten Abschnitts der Erbsubstanz waren viele Hunderassen also durchaus keine reinen Linien. Bei den acht untersuchten Schäferhunden etwa gab es fünf teilweise sehr verschiedene Sequenzen und bei sechs Golden Retrievern vier.

Hierzu muß man allerdings wissen, daß in der Studie nicht reguläres Erbmaterial aus dem Zellkern, sondern ein Abschnitt des Erbguts von Mitochondrien

verglichen wurde. Diese Zellorganellen enthalten gleichfalls DNA, die aber nicht wie die des Zellkerns von beiden Eltern stammt und deshalb auch nicht nach bestimmten Regeln jeweils neu verteilt und vermischt wird; vielmehr erbt man sie nur von der Mutter. Eben das machen sich Genetiker in solchen Analysen zunutze, die seit einigen Jahren für Stammbaumrekonstruktionen regelrecht Mode geworden sind. Auch für menschliche Populationen hat man solche Herkunftsanalysen angestellt (Spektrum der Wissenschaft, Februar 1991, Seite 112, und Juni 1992, Seite 72).

Anhand der weiblichen Linien läßt sich die Abstammung vergleichsweise sauber zurückverfolgen. Indem man Sequenzen von mitochondrialen DNA-Abschnitten analysiert, die für Lebensfunktionen offenbar unwichtig sind, so daß Mutationen darin dem Individuum nicht schaden, kann man – durch schlichtes Zählen solcher Abweichungen – außerdem Evolutionsabstände messen. Da die Mutationsraten ziemlich konstant zu sein scheinen, sollten mehr Divergenzen gegenüber einer Vergleichssequenz eine größere evolutive Entfernung bedeuten, und das heißt einen größeren Zeitabstand seit der Trennung.

Freiwilliger Anschluß an den Menschen?

Unter diesem Aspekt ergab die Analyse völlig überraschend einen wesentlich früheren Schätzwert als den oben genannten für den mutmaßlichen Zeitpunkt, als die Hunde sich von den Wölfen abspalteten. Demnach könnte sich die Trennung schon vor mehr als 100 000 Jahren vollzogen haben; damit wäre der Hund sehr viel früher domestiziert worden als nach heutigem Wissen jedes andere Haustier. Auch wenn manche Experten Zweifel an dieser Datierung angemeldet haben, so sind sich Vilà und Wayne doch sicher, daß die Assoziation des Hundes mit dem Menschen zumindest deutlich früher begonnen haben muß als bisher angenommen. Zwar ist die Geschwindigkeit der molekularen Uhr für Mutationen in Mitochondrien nur ungefähr bekannt, weswegen die Berechnungen eine gewisse Schwankungsbreite haben; doch Erfahrungen mit gleichen Daten von anderen Stammbäumen machen die Folgerung wahrscheinlich.

So lassen sich die 26 Hundesequenzen nach ihrer Ähnlichkeit in vier Gruppen (Cluster) einteilen, von denen die mit Abstand umfangreichste in sich eine so große Mutationsbreite aufweist, wie sie nur über einen längeren Evolutionszeitraum hinweg zustande kommt. Überdies ist keine Sequenz innerhalb dieser Gruppe einer von Wölfen sonderlich ähnlich, weswegen sich auch nicht feststellen ließ, ob die frühen Haushunde mit den Vorfahren einer bestimmten heutigen Wolfspopulation näher verwandt waren. Diese DNA-Stücke müssen demnach seit der Abspaltung eine mindestens mehrere zehntausend Jahre währende eigene Entwicklung durchgemacht haben. Heute finden sie sich in rund zwei Dritteln der Hunderassen, primitiven ebenso wie hochgezüchteten modernen.

Wenn die eigene Entwicklung der Haushunde tatsächlich so viel weiter zurückreichen sollte als bisher angenommen – wie kommt es dann, daß sich Fossilien von ihnen erst in viel späterer Zeit finden? Reste von Wolfsknochen kommen bei menschlichen Aufenthaltsorten bereits seit mehreren hunderttausend Jahren vor. Offenbar pflegten Menschen schon engen Kontakt zu dem Raubtier, bevor der moderne *Homo sapiens* vor vielleicht 100 000 Jahren, wahrscheinlich von Afrika kommend, in Südwestasien auftrat. Laut Vilà und Wayne könnten die Tiere, als sie sich an den Umgang mit den damals noch umherziehenden menschlichen Horden anpaßten, zwar schon – genetisch bedingt – umgänglicher und lenkbarer geworden sein, sich aber nicht gleich morphologisch so deutlich verändert haben, daß dies an Knochen und Zähnen sichtbar wäre. Möglicherweise vollzog sich die eigentliche Anpassung wirklich erst, als der Mensch anfing, Ackerbau und Viehzucht zu treiben, und nun auch Hunde zu vielerlei Aufgaben wie zum Hüten und Bewachen oder zur Jagd anstellte und sie speziell dafür züchtete.

Optische Nahfeldmikroskopie mit Farbstoffen

Untersuchungen der Diffusion von Farbstoffmolekülen in einem polymeren Dünnfilm mittels Nahfeldmikroskopie ergaben, daß die Bewegung der Teilchen nicht etwa zufällig ist, sondern durch die lokalen Gegebenheiten beeinflußt wird.

Von Guido Tarrach, Martin A. Bopp, M. Andreas Lieb und Alfred J. Meixner

Klassische optische Mikroskope enthüllen mit bloßem Auge nicht mehr erkennbare feine Formen und Strukturen sowie deren Farben. Doch Beugungseffekte, die auf der Wellennatur des Lichts beruhen, begrenzen die Auflösung, also den kleinsten Abstand, in dem zwei Objekte noch getrennt erkennbar sind: Trifft die Wellenfront auf eine Kante, zerfällt sie dort in elementare Kugelwellen, die darum herumlaufen und dann miteinander interferieren; ein punktförmiges Objekt erscheint deshalb immer als Scheibchen aus konzentrischen Beugungsringen, und die Beugungsscheibchen zweier Punkte überlagern einander. Beträgt ihr Abstand weniger als ungefähr die Hälfte einer Wellenlänge, sind sie nicht mehr zu unterscheiden; im sichtbaren Teil des Spektrums beträgt diese kritische Entfernung etwa 300 Nanometer (milliardstel Meter.)

Elektronen- oder Rastersondenmikroskope arbeiten deshalb nicht mit Licht. Sie erreichen dadurch zwar eine viel höhere Auflösung, liefern aber keine Farbinformationen.

Funktionsprinzip der Nahfeldmikroskopie

Allerdings ist es auch möglich, ein Lichtmikroskop zu bauen, das nicht an die Beugungsgrenze gebunden ist: das optische Nahfeldmikroskop (*scanning near-field optical microscope*, SNOM). Anstatt von einem Untersuchungsgegenstand ausgehendes Licht mit Linsen auf ein möglichst kleines Volumen zu fokussieren, verkleinert man beim Nahfeldmikroskop die Lichtquelle selbst auf beinahe Punktgröße und beleuchtet somit lokal. Das Licht wird dann von einer konventionellen Optik gesammelt und auf einen Detektor fokussiert. Indem sich das Objekt in kleinen Schritten unter der Lichtquelle hindurchbewegt, erhält man an jedem Punkt dieser Rasterung einen Helligkeitswert. Während also die klassische Optik alle Punkte eines Objektes gleichzeitig abbildet, geschieht dies bei SNOM sukzessive.

Das räumliche Auflösungsvermögen wird nun zum einen durch die Größe der Lichtquelle bestimmt. Gelingt es, sie

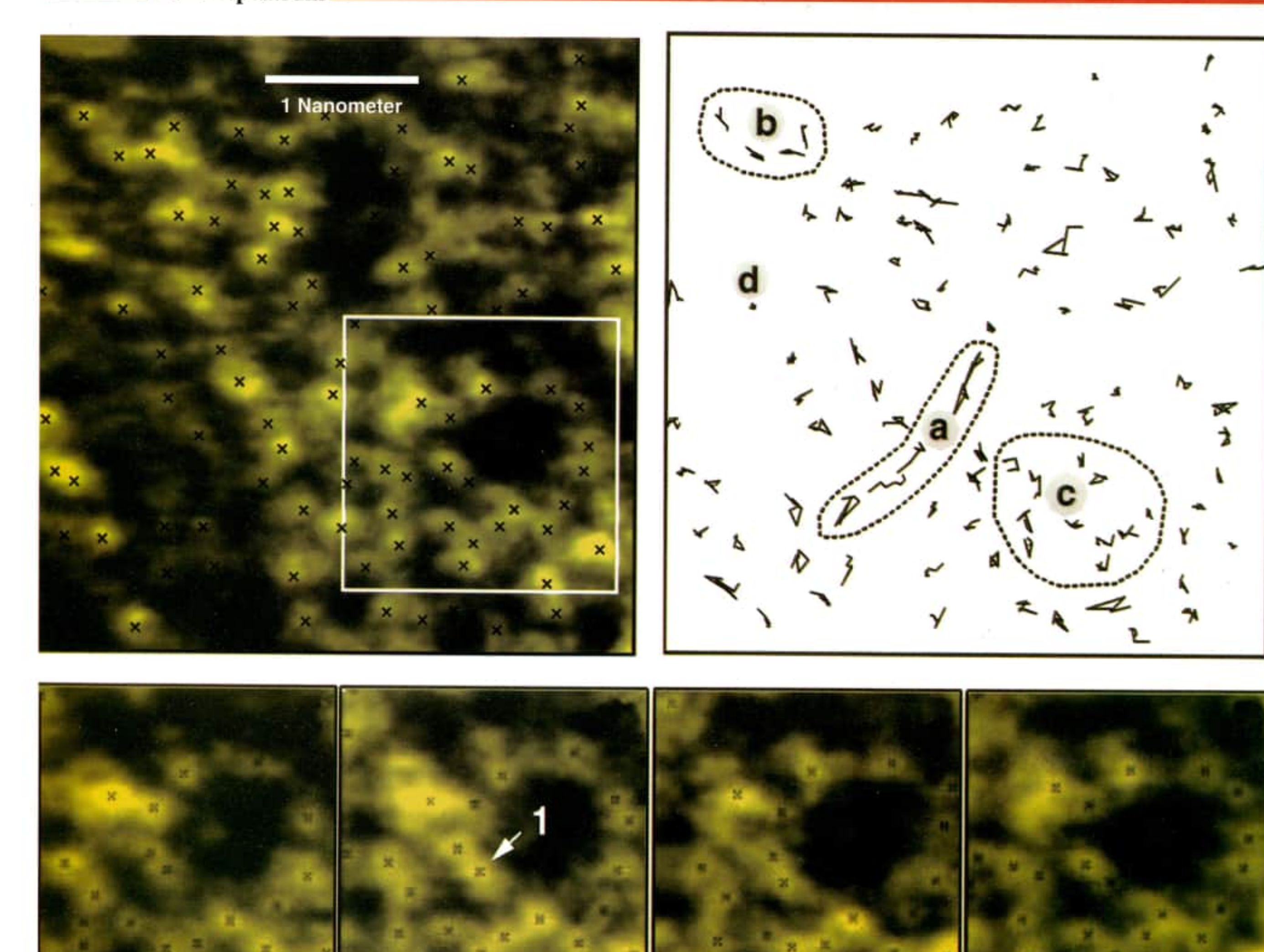


Bild 1: Ein Ausschnitt mit vier Mikrometern (tausendstel Millimeter) Kantenlänge aus einem 25 Nanometer dünnen Polyvinylbutyral-Film. Dem Kunststoff sind in hoher Konzentration Farbstoff-Moleküle (Rhodamin 6G) beigegeben, die im Licht des Nahfeldmikroskops fluoreszieren (oben links); mit Kreuzen markierte Flecke entsprechen jeweils dem Signal eines Moleküls. Der Rastervorgang dauerte 13 Minuten pro Aufnahme, wobei an jedem Bildpunkt während zehn Millisekunden zwischen 30 und 330 Fluoreszenz-Photonen gezählt wurden. Betrachtet man die Diffusionswege über sieben Aufnahmen hinweg (oben rechts), zeigen sich große regionale Unterschiede. In den Bereichen *a* und *b* verlief die Bewegung der Moleküle vorwiegend geradlinig, dagegen ungerichtet in *c*; am Ort *d* fand praktisch keine Diffusion statt. Diese Unterschiede deuten auf lokale Inhomogenitäten des makroskopisch einheitlich erscheinenden Polymers hin. Schwankungen der Helligkeit der Signale von Aufnahme zu Aufnahme – die untere Bildfolge zeigt den weiß markierten Ausschnitt in 13-Minuten-Intervallen – beruhen auf Wanderungen oder Drehungen der Moleküle relativ zur Spitze, wie an den Molekülen 1 und 2 gut zu sehen ist. Rotationen können auch geringe seitliche Versetzung vortäuschen.

deutlich kleiner als die Wellenlänge zu machen, so erreicht man eine Auflösung jenseits der Beugungsgrenze. Dazu muß man aber den Abstand vom Objekt so klein wie möglich halten. Die Intensität einer Quasipunktlichtquelle ist nämlich im sogenannten Nahfeld – bis zum Abstand von etwa 20 Nanometern – sehr hoch, nimmt jedoch stärker als mit dem Quadrat der Entfernung ab. Dabei weitet sich der Strahl auch immer mehr auf, bis er dem einer ausgedehnten Lichtquelle gleichkommt. Man erreicht also die hohe Auflösung, indem man die Beleuchtung im wesentlichen auf ein Volumen konzentriert, das erheblich kleiner ist als im Fokus der klassischen oder auch der konfokalen Mikroskopie (Spektrum der Wissenschaft, Oktober 1994, Seite 85).

Allerdings lassen sich so nur Einzelheiten in der Nähe der Oberfläche eines Objekts gut auflösen. Weil aber der Abstand zur Oberfläche beim Abtasten konstant gehalten werden muß, ergibt sich zusätzlich deren Topographie.

Für den Betrachter geht bei diesem Verfahren, wie auch bei der Elektronenmikroskopie, die Unmittelbarkeit des Bildes verloren. Trotzdem ist die enthaltene Information optischer Natur, weil sie durch die Streuung von Licht am Objekt gewonnen wird. Die Idee der Nahfeldoptik wurde bereits 1928 von dem irischen Physiker Edward Hutchinson Synge formuliert, die Machbarkeit 1972 am Londoner Universitätscollege mit Mikrowellen nachgewiesen. Mit Laser und Rastersondenmikroskopie gelangen Dieter W. Pohl und seinen Mitarbeitern am IBM-Forschungslabor in Zürich 1984 erstmals optische Messungen.

Technische Realisierung

Weil bei dem Verfahren die meisten Kontrastmechanismen wie Durchlicht, Auflicht, Polarisation und Fluoreszenz möglich sind, variiert der Aufbau eines



Geräts je nach Verwendungszweck. Meistens nutzt man Durchlicht, wobei die zu untersuchende Probe das Mikroskop in zwei Funktionsblöcke teilt. Über ihr befindet sich der Nahfeldteil zur lokalen Beleuchtung, unterhalb die klassische Optik zum Sammeln, Fokussieren und Messen des Lichts.

Zur Beleuchtung wird ein Laserstrahl in eine spezielle Glasfaser eingekoppelt. Deren Ende hat man unter Erwärmen zu einer feinen Spitze ausgezogen und, um zu verhindern, daß Licht seitlich austritt, gleichmäßig mit Aluminium beschichtet. Durch die vorn an der Spitze verbliebene Öffnung von nur etwa 50 bis 100 Nanometern Durchmesser tritt eine kleine Menge des entlang der Glasfaser geleiteten Lichts zur Probe aus.

Das dort gestreute oder durch Fluoreszenz emittierte Licht wird unterhalb des transparenten Substrats, das den Dünnfilm trägt, von einem kommerziellen Mikroskopobjektiv gesammelt und auf einen Detektor fokussiert, der die eigentliche Bildinformation als Ausgangssignal abgibt. Um möglichst guten Kontrast zu erreichen, wählt man eine sehr kleine, effiziente Halbleiterdiode, in der bereits ein Photon eine Elektronenlawine auslöst. Trotz der hohen Empfindlichkeit ist bei dieser *avalanche photo diode* der Dunkelstrom – Ladungsträger, die ohne Beleuchtung spontan entstehen und das Meßergebnis verfälschen – sehr gering.

Alternativ kann man eine Lochblende derart in die Bildebene bringen, daß die Spitze gerade auf das Loch abgebildet wird. Diese konfokale Anordnung unterdrückt den größten Teil des Untergrundlichts. Bei der Fluoreszenzmikroskopie muß man zusätzlich das anregende vom emittierten Licht mit Spiegeln und Filtern trennen.

Positionierung, Rasterung in der Ebene sowie eine auf einen Nanometer exakte Regelung des fünf Nanometer großen Abstands erfolgen nicht durch Bewegen der Spitze, sondern durch Verschieben der Probe, die dazu auf einem piezoelektrisch ansteuerbaren Halter montiert ist. Die Regelung des Abstands zwischen Objekt und Sonde basiert darauf, daß Kräfte zwischen beiden, deren Ursachen noch nicht vollständig geklärt sind, eine mit einem Piezokristall angeregte seitliche Vibration der Spitze um so stärker dämpfen, je mehr sich diese der Probenoberfläche nähert. Die Amplitude dieser Vibration wird mit einem Glasfaser-Interferometer gemessen.

Fluoreszierende Farbstoffmoleküle eignen sich zum Studium der Wechselwirkung einzelner Moleküle mit Licht

Wie ein Leguan auf dem Wasser läuft

Von James W. Glasheen und Thomas A. McMahon

Die Helmbasilisken sind berühmt für ihre einzigartige Fähigkeit, sich rennend auf dem Wasser fortzubewegen. Die olivbraunen Echsen aus der Familie der Leguane mit den zwei hellen Seitenstreifen und dunklen Querflekken werden bis zu 80 Zentimeter lang und 200 Gramm schwer. Besondere Merkmale sind außer einem enormen Schwanz, der rund zwei Drittel der Körperlänge ausmacht, der namengebende Kopfhelm sowie ein hoher Rükkenkamm bei den Männchen.

Die Tiere leben in den tropischen Regenwäldern Mittelamerikas und ernähren sich von Kleintieren und Früchten. Normalerweise sitzen sie auf überhängenden Zweigen am Rand eines Gewässers. Werden sie erschreckt, lassen sie sich ins Wasser fallen und flitzen auf ihren Hinterbeinen in halb aufrechter Stellung über die Oberfläche des Teichs oder Flusses; junge Tiere scheinen dabei völlig in der Luft dahinzugleiten, während erwachsene Exemplare etwas einsinken. Basilisken können zwar auch ausgezeichnet schwimmen und tauchen; doch erreichen sie beim Sprint über die Wasseroberfläche mit bis zu zwölf Kilometern pro Stunde eine wesentlich höhere Geschwindigkeit, so daß sie angreifenden Wassertieren leicht entkommen.

Um die physikalischen Hintergründe der wundersamen Beinahe-Levitation genauer zu erforschen, machten wir Videoaufnahmen von sieben Basilisken beim strampelnden Lauf übers Wasser und konstruierten mechanische Modelle. Dadurch konnten wir den Bewegungsablauf minutiös verfolgen und ermitteln, welche Komponenten wie stark zum Auftrieb beitragen.

Als erstes patscht der Basilisk mit einem seiner beiden Hinterfüße, die





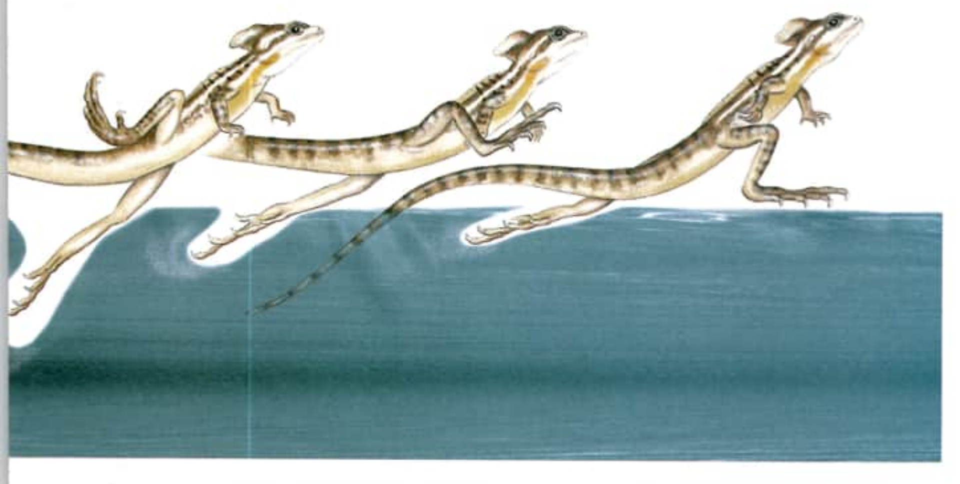
fünf lange, krallenbewehrte Zehen tragen, auf die Wasseroberfläche. Bei einem mittelgroßen, etwa 90 Gramm wiegenden Tier liefert die Oberflächenspannung des Wassers, die beim Kontakt mit dem flach aufgesetzten Fuß wirksam wird, immerhin 23 Prozent der Kraft, die nötig ist, den Körper in der Luft zu halten. Im nächsten Sekundenbruchteil drückt die Echse den gespreizten Fuß mit einer Schlagbewegung nach unten, so daß er abrupt Wasser verdrängt und eine luftgefüllte Vertiefung erzeugt. Der Basilisk stößt sich dabei gewissermaßen an den weggeschleuderten Wassermassen ab und nutzt zugleich die hydrostatische Druckdifferenz zwischen der Oberfläche des Wassers und dem Boden des luftgefüllten Hohlraums unter seinem Fuß. Zusammen mit der Oberflächenspannung des Wassers können beide Effekte nach unseren Berechnungen 111 Prozent der Tragkraft erzeugen, die eine ausgewachsene Echse braucht, um nicht einzusinken. Jungtiere mit nur zwei Gramm Gewicht sollten sogar 225 Prozent des benötigten Auftriebs gewinnen, was erklärt, warum sie eleganter und müheloser über Gewässer spurten.

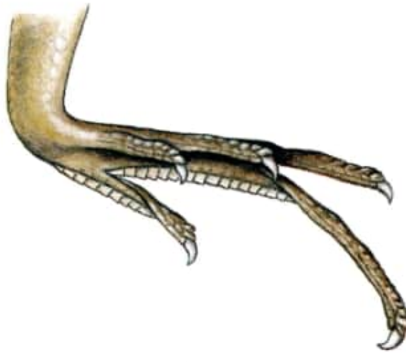
Doch wie erreicht die Echse, daß der beim Niederdrücken des Fußes erzielte Auftrieb nicht beim Anheben wieder verloren geht? Der Trick besteht darin, den Fuß aus dem luftgefüllten Hohlraum im Wasser herauszuziehen, bevor dieser sich geschlossen hat; so vermeidet das Tier den sehr viel höheren Reibungswiderstand der Flüssigkeit. Wie genaues Hinsehen ergab, schleudert es seine Zehen nach hinten, streckt sie dabei und läßt den Fuß aus dem Wasser gleiten, solange er noch von Luft umgeben ist.

Hilfreich dürfte sich dabei ein schmaler Hautsaum an den Rändern der Zehen auswirken. Wie ein Fallschirm bläht er sich beim Eintauchen ins Wasser auf und erhöht so den Wirkungsquerschnitt und damit den Abstoßungseffekt. Beim Herausziehen klappt er dagegen zusammen, was den Fuß schmaler macht, so daß er gut durch den vorher erzeugten luftgefüllten Hohlraum paßt.

Außer Basilisken vermögen nur einige Wasservögel mit Schwimmhäuten zwischen den Zehen über die Wasseroberfläche zu laufen; doch ist der physikalische Mechanismus dabei anders und bisher nicht genau erforscht. Menschen können von den Basilisken jedenfalls nichts lernen – außer lieber nicht zu versuchen, übers Wasser zu wandeln. Ein erwachsener Mann mit 80 Kilogramm Körpergewicht müßte dazu eine Geschwindigkeit von 110 Kilometern pro Stunde (30 Metern pro Sekunde) erreichen und 15mal so viel Muskelenergie aufbringen, wie seine Stoffwechselmaschinerie hergibt.

Dr. McMahon ist Professor für angewandte Mechanik sowie Professor für Biologie in der Abteilung für Ingenieurwesen und angewandte Wissenschaft der Harvard-Universität in Cambridge (Massachusetts).
Sein Doktorand Glasheen ist nun bei McKinsey & Co Unternehmensberater.







Helmbasilisken scheinen bei ihrem Spurt auf den Hinterbeinen über die Wasseroberfläche der Schwerkraft zu trotzen – hier eine Aufnahme aus dem tropischen Regenwald Costa Ricas (links unten). Die Analyse des genauen Bewegungsablaufs (links oben) hat nun jedoch eine Erklärung für das erstaunliche Phänomen geliefert. Beim raschen Strampeln – die Echse macht etwa 20 Schritte pro Sekunde, während sie über das Wasser wetzt – wird der Fuß so schnell in die Oberfläche der Flüssigkeit gedrückt, daß eine luftgefüllte Vertiefung entsteht, aus der das Tier den Fuß wieder herauszieht, bevor sie sich mit Wasser gefüllt hat. Eine Kombination aus Oberflächenspannung, Abstoßungseffekt beim Niederdrücken des Wassers unter dem Fuß und der Differenz zwischen dem hydrostatischen Druck an der Wasseroberfläche und am Boden der luftgefüllten Vertiefung liefert den nötigen Auftrieb zur Kompensation des Körpergewichts. Hilfreich sind dabei auch Hautfalten an den Rändern der Zehen (oben), die sich beim Niederdrücken des Fußes im Wasser aufblähen und beim nachfolgenden Anheben zusammenlegen.

und als optische Sonden in einem Dünnfilm oder an einer Oberfläche. Aus Spektrum und Intensität des Fluoreszenzlichts, der räumlichen Anordnung der aussendenden Moleküle sowie der zeitlichen Änderung all dieser Variablen kann man auf die Umgebung jedes einzelnen Moleküls schließen. Eric Betzig und Robert J. Chichester von den AT&T-Bell-Laboratorien in Murray Hill (New York) gelang 1993 erstmals eine solche Messung einzelner Farbstoffmoleküle bei Zimmertemperatur. Weil man dabei immer nur kurz das Molekül beleuchtet, das sich gerade unter der Spitze befindet, bleicht das farbige Objekt langsamer aus und läßt sich länger untersuchen.

Diffusion in Polymeren

Wir erforschten auf diese Weise, ob sich lokale Strukturunterschiede in makroskopisch ungeordnet erscheinenden Polymeren auf die Diffusion von Fremdmolekülen auswirken. Unsere Probe bestand aus einem 0,1 Millimeter dicken Glassubstrat mit einem 25 Nanometer dünnen Film aus Polyvinylbutyral (PVB), der den Farbstoff Rhodamin 6G (R6G) in relativ hoher Konzentration enthielt. Angeregt wurde mit dem grünen Licht eines Argon-Ionen-Lasers von 514 Nanometern Wellenlänge; das Fluoreszenzlicht war gelb mit einem Maximum bei etwa 560 Nanometern.

Jedes Farbstoffmolekül erschien in den Bildern als heller Fleck von 60 bis 180 Nanometern Durchmesser (Bild 1 auf Seite 28). Dessen Helligkeit variierte allerdings, je nach Lage des Moleküls im Film: Je näher es sich der Oberfläche befand, desto stärker wurde es angeregt.

Eine Bildsequenz desselben Probenausschnitts über längere Zeit zeigt die Diffusionsbewegung (Bild 1 unten). Sie ist, wie man sieht, durchaus nicht überall isotrop und zufällig, sondern geht in einigen Regionen etwa nur in eine einzige Richtung oder findet in anderen gar nicht statt. Offenbar gab es in dem Kunststofffilm Bereiche mit teilweise ausgerichteten Ketten und andere mit verschlungenen Knäueln.

Auch die Intensität der einzelnen Fluoreszenzflecken variierte, wobei sie zum Beispiel zunächst ab- und dann wieder zunahm. Außerdem waren die Änderungen von Fleck zu Fleck oft sehr unterschiedlich. Beides bestätigt die Annahme, einzelne Moleküle seien Quelle der Signale: Bei einem ganzen Ensemble würden sich solche Variationen statistisch ausmitteln und die Veränderungen monoton erscheinen.

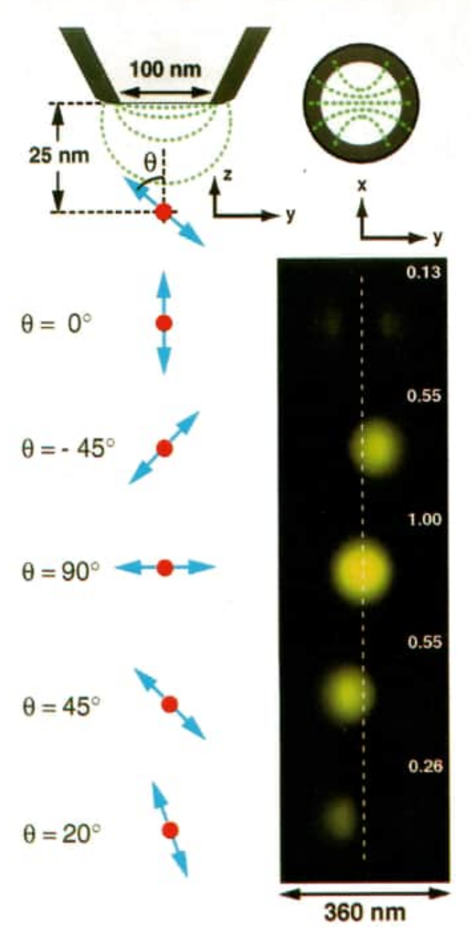


Bild 2: Eine Simulation des erwarteten Fluoreszenzbildes eines einzelnen Moleküls (roter Punkt) zeigt die Abhängigkeit der Intensität von der Orientierung seines Übergangsdipolmoments (blauer Pfeil), das durch die Ladungsverschiebung beim Übergang des Moleküls in den angeregten Zustand entsteht. Dazu muß ein Photon mit geeigneter Polarisation, also Ausrichtung des elektromagnetischen Feldes, absorbiert werden (grüne Feldlinien). Während das Molekül in einem Abstand von 25 Nanometern (millionstel Millimetern) unter der Spitze fixiert bleibt, wird der Winkel θ des Dipols verändert. Das rechts abgebildete Resultat zeigt, daß nur bei einem Winkel von 90 Grad ein fast kreisrunder Fluoreszenzfleck und maximale Intensität (rechte Skala) zu erwarten sind; ansonsten erscheint der Fleck halbmondförmig deformiert und teilt sich bei 0 Grad sogar auf, wobei die Intensität dann auf etwa ein Zehntel sinkt. Auch verschiebt sich der Schwerpunkt des Flecks bei einer Rotation gegenüber der festen *y*-Position des Moleküls (gestrichelte weiße Linie), was eine geringfügige seitliche Diffusion vortäuscht.

Die Intensitätsschwankungen lassen sich im wesentlichen auf zwei Effekte zurückführen: Die Moleküle diffundieren auch in die Tiefe und verändern dabei den Abstand zur Spitze. Zudem können sie sich drehen und dabei quantenmechanische Parameter ihres Zustands ändern. Im allgemeinen wird ein Farbstoffmolekül am effizientesten zur Fluoreszenz angeregt, wenn sein Übergangsdipolmoment parallel zur Polarisationsrichtung des Lichts ausgerichtet ist (bei der Anregung verschiebt sich die Ladungsverteilung, so daß kurzzeitig dieses Dipolmoment entsteht). Sind beide senkrecht zueinander orientiert, findet praktisch keine Anregung statt, und das Molekül bleibt dunkel.

Diesen Effekt zeigt auch eine Simulation (Bild 2). Wie man erkennt, ist die Intensität im berechneten Fluoreszenzbild eines einzelnen Moleküls nur dann maximal, wenn der Übergangsdipol parallel zum elektrischen Feld verläuft; bei senkrechter Orientierung ist sie dagegen fast zehnmal kleiner. Außerdem ändert sich die Form des Flecks: Während er im Maximum fast kreisrund ist, deformiert er sich bei schiefen Winkeln zu einem Halbmond und teilt sich im Minimum sogar in zwei Flecken.

Obwohl die statistische Auswertung vieler Moleküle mit den Ergebnissen eines zweidimensionalen Modells mit zufälligen Verschiebungen (*random walk*) sehr gut übereinstimmte, belegte die Analyse der Fluoreszenzbilder, daß die Diffusionsbewegung im Sub-Mikrometerbereich keineswegs überall isotrop ist. Deshalb ermöglichen Untersuchungsmethoden, die lediglich Informationen über ein großes Ensemble liefern, kein detailliertes Verständnis der mikroskopischen Vorgänge. Dies vermag nur die Nahfeldmikroskopie, indem sie Aufschluß über das Verhalten jedes einzelnen Farbstoffmoleküls gibt.

Privatdozent Dr. Meixner promovierte an der Eidgenössischen Technischen Hochschule (ETH) Zürich über spektrales Lochbrennen und Holographie, wofür er die ETH-Medaille erhielt. Seit 1992 leitet er ein Projekt auf dem Gebiet der Nahfeldoptik und der Fluoreszenz einzelner Moleküle an der Universität Basel. Prof. Dr. Tarrach studierte Physik, Mathematik und Betriebswirtschaftslehre an der Universität Basel und promovierte über Rastertunnelmikroskopie halbleitender und magnetischer Materialien. Seit April 1997 ist er Professor für Physik an der Pontificia Universidad Católica de Chile in Santiago und baut dort ein neues Labor auf. Diplom-Physiker Dr. Bopp arbeitet als Postdoktorand an der Universität von Pennsylvanien in Philadelphia. Diplom-Physiker Lieb promoviert bei Dr. Meixner über die Spektroskopie einzelner Moleküle.

Die Zukunft der Industrieforschung

Ein Wirtschaftsstandort hängt zu einem großen Teil von der Regsamkeit in Forschung und Entwicklung ab. Aus Sicht der Industrie hat Deutschland auf diesem Feld an Attraktivität eingebüßt. Pol Bamelis, Vorstandsmitglied der Bayer AG, Claus Weyrich, Vorstandsmitglied der Siemens AG, und Erich Staudt vom Institut für angewandte Innovationsforschung in Bochum diskutieren die Perspektiven. Hans Wohlfahrt, Präsident der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen, erörtert die Möglichkeiten kooperativer Forschung kleiner und mittlerer Unternehmen.

Nach Erhebungen des Stifterverbandes für die Deutsche Wissenschaft, der in Deutschland die Wissenschaftsstatistik führt, ist der Anteil der Ausgaben für Forschung und Entwicklung (FuE) am Bruttosozialprodukt der Bundesrepublik von 1989 bis 1995 von 2,9 auf 2,35 Prozent kontinuierlich gefallen. Allerdings scheint es so, daß die Wirtschaft wieder mehr investiert: Sie gab 1996 für Forschung und Entwicklung rund 58,8 Milliarden Mark aus, 1,8 Prozent mehr als noch im Jahr zuvor. Ein Hoffnungsschimmer nach einer Phase der Stagnation und des Rückgangs?

Staudt: All diese Zahlen sagen im Grunde genommen recht wenig aus und täuschen häufig sogar über die wahre Situation hinweg. So ist der FuE-Haushalt der öffentlichen Hand weitgehend Etikettenschwindel.

Das wird deutlich, wenn man einen speziellen Bereich, etwa die Medizin, einmal genauer betrachtet: Häufig entfällt der überwiegende Anteil am Haushalt der Hochschulen, die eine medizinische Fakultät haben, eben darauf. Aber dieser Haushaltsanteil repräsentiert nun nicht nur Wissenschaft und Forschung, sondern darin verstecken sich wiederum zu einem wesentlichen Anteil Aufwendungen für die regionale Krankenversorgung. Das sind in Wirklichkeit schlicht Subventionen für diesen Zweck.

Meines Erachtens müssen die Entwicklungen mehr qualitativ betrachtet werden, um die Realität zu erfassen. Ich behaupte: Wir leisten uns gegenwärtig relativ wesentlich weniger Forschung und Entwicklung als jemals zuvor in der knapp fünfzigjährigen Geschichte der Bundesrepublik.

Weyrich: Die Zahlen der Wissenschaftsstatistik dürfen nicht einfach in Form der absoluten Beträge betrachtet werden, denn die Zeiten haben sich geändert. Mehr Geld für Forschung ist nicht einfach gut und weniger einfach schlecht. Zu fragen ist: Was hat sich wirklich getan? Wofür wird das Geld ausgegeben? Wie wird es strategisch eingesetzt? Was wird damit erreicht? Wie werden Forschungsinvestitionen in Ergebnisse umgesetzt? Im Vergleich zur öffentlichen Forschung stagnieren die Ausgaben für Forschung und Entwicklung der Wirtschaft nicht nur national, sondern weltweit auf einem gewissen Level, sie nehmen prozentual auf den Umsatz bezogen sogar leicht ab – das gilt auf jeden Fall für die Elektroindustrie.

Beginnen wir mit dem Warum.

Weyrich: Dafür gibt es mehrere Gründe. Durch die Globalisierung des Wettbewerbs, der sehr hart geworden ist, haben weltweit in allen Unternehmen Restrukturierungen stattgefunden, die inzwischen nicht mehr nur die Fertigung oder den Vertrieb, sondern auch die Forschung und Entwicklung betreffen. In der Elektroindustrie verlagern sich zudem die Aktivitäten – und damit die Wertschöpfung – von der Hardware hin zur Software, und dies gilt auch wieder für Forschung und Entwicklung. Damit sind Kostenverschiebungen verbunden. Außerdem forschen immer mehr Firmen im Verbund mit Kooperationspartnern – gerade im High-Tech-Bereich, der sehr kostenintensiv ist –, um Kosten zu sparen und das Risiko zu teilen. Und zu einem wachsenden Teil nehmen Firmen inzwischen auch Forschungs- und Entwicklungsleistungen in Ländern in Anspruch, in denen diese kostengünstiger sind als in Deutschland.

In dem Aufruf „Priorität für die Zukunft" haben sich einflußreiche Wissenschaftsmanager Anfang dieses Jahres dafür ausgesprochen, den Anteil der Ausgaben für Forschung und Entwicklung wieder der Drei-Prozent-Marke anzunähern. In unserem FORUM „Die Krise der Forschung" (Spektrum der Wissenschaft, Mai 1997, Seite 30) warnten die Leiter der öffentlich geförderten Forschungsinstitutionen vor Erstarrung infolge unbedachter Sparmaßnahmen, rügten aber auch die Wirtschaft, es mangele an Engagement, sehr wohl vorhandene Forschungsergebnisse zur Kenntnis zu nehmen und praktisch umzusetzen. Haben in der Industrie langfristige Forschungsvorhaben überhaupt noch eine Chance? Offenbar ist sie vor allem bestrebt, verbesserte und neue Produkte in immer kürzeren Zeitabständen zu vermarkten.



Pol Bamelis, Erich Staudt und Claus Weyrich im Gespräch über die Situation der Industrieforschung in Deutschland.

Weyrich: Eine Unterscheidung von Forschung oder Entwicklung ist für mich sehr schwer zu treffen, denn diese Begriffe sind nicht voneinander zu trennen. Daß nun die Zeithorizonte für einzelne Projekte auch in der öffentlichen Forschung immer näher an die Gegenwart heranrücken, daß strategisch in kürzeren Fristen gedacht und geplant wird, das sehe ich nicht als Makel an. Die Innovationsgeschwindigkeit hat tatsächlich enorm zugenommen; dies hat sich in der Industrieforschung bereits massiv ausgewirkt und macht sich nun unvermeidlich auch in der öffentlichen Forschung bemerkbar. Aber man muß immer differenzieren: In den Informations- und Kommunikationstechniken etwa vollziehen sich Entwicklungen und Innovationen noch viel kurzfristiger als beispielsweise im Energiesektor. Wir müssen uns also Angaben zu Veränderungen in den FuE-Ausgaben – um noch einmal auf Ihre Eingangsfrage zurückzukommen – sehr genau anschauen.

Die schwierige Situation, in der sich die Forschung in Deutschland befindet, sollte meines Erachtens nicht zum Jammern, sondern zum gemeinsamen gründlichen Nachdenken darüber anregen, was denn nun mit diesen 2,35 Prozent oder vielleicht auch einmal wieder 3 Prozent Anteil am Bruttosozialprodukt geschehen soll. Wie können die zur Verfügung stehenden Mittel am besten eingesetzt werden?

Bamelis: Selbstverständlich zielt die Forschung in einem Unternehmen immer auf die Entwicklung eines Produkts, und sie muß in dieser Hinsicht sehr effizient sein. Auch in der Chemie ist eine Grenze zwischen Forschung und Entwicklung nur sehr schwer zu ziehen. Für die Entwicklung eines Medikaments etwa brauchen wir unter anderem intensive Grundlagenforschung in der Biochemie.

Die Siemens AG gibt jährlich 7,3 Milliarden Mark für Forschung und Entwicklung aus, etwa 8 Prozent des Umsatzes. Die Bayer AG will in diesem Jahr 3,7 Milliarden Mark in die Forschung investieren – zwei große Unternehmen in völlig unterschiedlichen Geschäftsfeldern. Sind diese Zahlen überhaupt qualitativ vergleichbar?

Weyrich: Sicherlich gibt es hier und da kleine Nuancen, Unterschiede. Was als Forschung und Entwicklung ausgewiesen wird bestimmen die Unternehmen, und was letztlich anerkannt wird bestimmt das Steuerrecht. Innerhalb eines Landes sind die Unterschiede von Branche zu Branche unter diesen fiskalischen Gesichtspunkten geringer als zwischen Ländern. Aber auch solche differenzierten Betrachtungen würden wenig an den generellen Trends ändern.

Welche Auswirkungen hat ein schärferer internationaler Wettbewerb auf die Forschung zum Beispiel der chemischen Industrie, Herr Bamelis?

Bamelis: Insgesamt hat die chemische Industrie weltweit ihre Aktivitäten in Forschung und Entwicklung verstärkt. In Deutschland lagen 1996 die Forschungskosten in der Chemie rund sechs Prozent höher als im Vorjahr. Indes gibt es in meiner Branche inzwischen eine klare Tendenz hin zur Internationalisierung der Forschung, denn schließlich unterliegt auch sie dem Gesetz von Angebot und Nachfrage. Die Nachfrage nach neuen Produkten ist groß, und es gibt weltweit Angebote, mithin internationalen Wettbewerb. Wir müssen uns deshalb fragen: Was hat Deutschland in der Forschung zu bieten, was Europa, Japan, die

USA? Allgemein tendieren nach meiner Beobachtung die Unternehmen dazu, mehr und mehr Dienstleistung einzukaufen. Auch Bayer hat die Antennen nach draußen gerichtet. Externe Forschung hat inzwischen bei uns einen Anteil von 11 Prozent, und wir wollen diesen Anteil noch erhöhen. Nur geht das alles nicht von heute auf morgen, denn hinter den anderen 89 Prozent stecken rund 12 000 Menschen.

Wenn Sie Forschungsleistung außerhalb des Unternehmens einkaufen, fragen Sie auch außerhalb Deutschlands nach. Warum betreibt ein Unternehmen Forschung im Ausland?

Bamelis: Unsere Forschung wird nicht mehr ausschließlich von Bayer-Mitarbeitern betrieben, sondern von Wissenschaftlern in Universitäten, Forschungsinstituten und kleineren Forschungsfirmen – an welchem Ort der Welt auch immer. Wir wollen die klügsten Köpfe für uns gewinnen; darum haben wir Forschungszentren in den USA und in Japan eingerichtet, und wir denken auch an Forschungsaktivitäten in Ländern wie China, Indien oder Rußland. Internationale Kooperationen dieser Art sind in der heutigen Zeit außerordentlich wirksam, da wir mit knappen Budgets und relativ geringem Zeitaufwand zurechtkommen müssen. Wir müssen angesichts des globalen Wettbewerbs die weltweit verteilten Humanressourcen für unsere Forschung und Entwicklung nutzen.

Wie konkurrenzfähig ist denn dabei noch die deutsche Forschung und Entwicklung?

Staudt: Ich bin wahrlich kein Anhänger der These von immer schneller aufeinander folgenden Entwicklungszyklen, wie Herr Weyrich sie beschrieben hat. Ich beklage aber ein eklatantes Defizit in der Ausrichtung auf längerfristige unabhängige Forschung. Ich würde mich freuen, wenn die internationale Konkurrenz endlich dazu beitragen würde, unsere festgefahrenen Forschungsstrukturen in Deutschland einmal aufzubrechen: Mit der Besetzung eines Lehrstuhls ist für 30 bis 40 Jahre an einer Universität ein Themengebiet belegt, und leider ist zu beklagen, daß der Inhaber eines Lehrstuhls während dieser langen Zeit meist nicht das Themengebiet verläßt. Die Zeitkonstanten in der universitären und sonstigen öffentlichen Forschung sind geradezu beängstigend lang.

In der deutschen Industrie ist indes die Situation nicht viel anders. Wohl hat sie tolle Spitzenleistungen aufzubieten – aber in obsoleten Gebieten, in denen der



Aufwand steigt und der wirtschaftliche Ertrag gegen null sinkt. Die Erhaltung alter Märkte, alter Produktionsprogramme und alter Technologien wird schwerlich den Standort Deutschland sichern können. Mit diesen Strukturen haben sich auch in den Unternehmen institutionelle Festschreibungen etabliert, denen man jetzt mit Outsourcing und Produktionsauslagerung ins Ausland begegnet, denn dort – denken Sie etwa an Großbritannien – nimmt die Flexibilität wieder zu.

Im Prinzip unterscheidet sich der Zustand der Industrieforschung kaum von der in den häufig als „Fossilien" angeklagten Großforschungseinrichtungen, der jetzigen Hermann von Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren. Nicht nur dort, sondern auch in der Industrie sitzen „Assistenten" im Alter von 50 Jahren, die noch weitere 15 Jahre bleiben und ihren Hobbys nachgehen werden. Um hier umzusteuern, muß ein personeller Austausch stattfinden, mit dem dann auch Technologie- und Kompetenzfelder wechseln. Mit der etablierten Forschergeneration wird das kaum gehen.

Die institutionelle Starre, die wir traditionell sowohl im öffentlichen als auch im industriellen Forschungssystem vorfinden, ist also ein gewaltiges Handicap. Hinzu kommt, daß wir in den achtziger Jahren zwar immer einen nominellen Zuwachs auf der Wirtschaftsseite gemessen haben, daß aber die Effektivität – so eines der Ergebnisse des Bochumer Instituts für Innovationsforschung – eher rückläufig war.

Auch im öffentlichen Bereich hat nach unserer Beobachtung die Effektivität von Forschung und Entwicklung nachgelassen. Immerhin versuchen die Beteiligten, die Defizite zu kompensieren. Man merkt das etwa daran, daß plötzlich Seminare zum Thema „FuE-Management" in Mode kommen. In den achtziger Jahren konnten wir demgegenüber noch die Arroganz des Naturwissenschaftlers beobachten – da ich selbst einer war, darf ich das so sagen. Dem Naturwissenschaftler und Ingenieur war ja nichts zu schwer. Er hat getan, was er kannte, was tradiert war; von Management mußte er nichts wissen.

Heute befinden wir uns also in einer Umbruchsituation, die nicht quantitativ, sondern qualitativ bewältigt werden muß. Das heißt unter anderem: völlige Neuausrichtung der Organisation, ob öffentlicher oder privatwirtschaftlicher Natur, und eine gesteigerte Umsetzungsgeschwindigkeit von der Forschung über die Entwicklung in Produkte.

Bamelis: Ich sehe, anders als Sie, doch einen Unterschied zwischen Wirtschaft und öffentlicher Forschung. Die Problemlage ist meiner Meinung nach in beiden Bereichen die gleiche, aber sie wird – hoffe ich – von der Wirtschaft





Die Siemens AG investiert jährlich rund 7,3 Milliarden Mark in Forschung und Entwicklung, das sind etwa 8 Prozent des Umsatzes. Eine verbesserte Software steigert zum Beispiel die Leistungsfähigkeit bildgebender Verfahren in der Medizin. Das Ultraschallsystem mit neuer Panoramatechnik kann auch große Organe und Gefäßabschnitte in voller Ausdehnung darstellen und vermessen (Mitte). Im österreichischen Linz haben Siemens-Ingenieure erstmals ein Stahlwalzwerk per Datenleitung in Betrieb gesetzt. Die Prozedur der Anpassung von Automatisierungssoftware an eine fertige Anlage war bisher zeit- und arbeitsintensiv; nun klinkt sich das Team der Fachleute per ISDN-Leitung in die viele Kilometer entfernte Anlage des Kunden ein (links). Siemens-Forscher in München-Perlach wollen die elektronische Unterschrift praktikabel machen; wird nicht nur die Form, sondern auch der Bewegungsablauf beim Unterschreiben zur Verifikation herangezogen, so erhält man ein praktisch fälschungssicheres Verfahren (rechts).

etwas besser gelöst als von Universitäten und öffentlichen Forschungseinrichtungen: Ich halte es für die wichtigste Aufgabe eines Forschungsmanagers, die besten Leute für die zu lösenden Aufgaben zu gewinnen und ihnen eine Umgebung zu bieten, die ihrer effektiven Arbeit zuträglich ist. Wir in der Industrie müssen – auf Gedeih und Verderb – dieser Maxime folgen, weil wir im Wettbewerb stehen. Die 3,7 Milliarden Mark, die Bayer in diesem Jahr für Forschung ausgibt, sind geradeso zu betrachten wie eine Investition in eine Produktionsanlage: Auch die Investition in Forschung muß am Ende eine Rendite bringen. Diese Mentalität, auch das Ziel Rendite bei jedweder Forschungstätigkeit stets vor Augen zu haben, müßte noch viel stärker Eingang in die Köpfe der Wissenschaftler finden. Es scheint mir außerordentlich wichtig, dies vor allem den jungen Leuten an den Universitäten rechtzeitig beizubringen. Sie müssen künftig besser als frühere Hochschulabsolventen das Heft in die eigene Hand nehmen und sich dem Wettbewerb stellen können.

Weyrich: Was Effektivität in der öffentlichen Forschung bedeutet ist sicherlich etwas schwieriger zu klären als Effektivität in der Industrie. Ich möchte aber behaupten, Herr Staudt – ich glaube, Herr Bamelis wird mir zustimmen –, daß die Industrie hinsichtlich der Produktivität in FuE in den letzten Jahren sehr viele Fortschritte gemacht hat. Man darf nicht alleine den Input – etwa an Geldmitteln – betrachten, sondern muß vor allem auf den Output schauen. Unsere Lernprozesse fanden beispielsweise darin ihren Niederschlag, eine systematische, durchaus langfristige Bedarfsentwicklung zu erarbeiten, Projektmanagement zu betreiben, die Teamarbeit zu forcieren. Und ich meine als Ergebnis konstatieren zu können, daß in der Industrieforschung gegenwärtig bei gleichem Einsatz wesentlich mehr herauskommt als vor fünf Jahren.

Wie holt man sich gute Mitarbeiter in die Firma? Wie funktioniert der Transfer zwischen einem Unternehmen und externen Anbietern von Forschung und Entwicklung? Wie steht es um die Schnittstelle Universität/Industrie?

Staudt: Forschung und Entwicklung bedeutet ja nicht einfach, zu beliebigen Ergebnissen zu gelangen, sondern zu innovieren, etwas Nützliches – auch wirtschaftlich Verwertbares – zu schaffen. Und hier haben sich die Verhältnisse, weltweit betrachtet, enorm zu unseren Ungunsten verschoben. Die deutsche Forschung ist vielleicht noch mit einem Anteil von weniger als zehn Prozent am weltweiten Wissenszuwachs beteiligt. Es kommt also nicht mehr nur darauf an, im richtigen – das heißt zukunftsträchtigen – Arbeitsgebiet Forschung und Entwicklung zu betreiben, sondern es wird immer wichtiger, zunächst einmal an die international erarbeiteten Forschungs- und Entwicklungsergebnisse heranzukommen. Hier entsteht insbesondere für die Industrieforschung ein Problem ganz neuer Art: Inzwischen sind überaus große Anstrengungen allein dafür erforderlich, auf dem laufenden zu sein.

Hinderlich für die Industrie ist unter diesem Gesichtspunkt das deutsche Hochschulerziehungssystem: Die jungen Leute lernen zwar, Wissenschaft zu betreiben, aber sie sind kaum für dieses Schnittstellenproblem neuer Art sensibilisiert. Sie haben überhaupt nicht gelernt, wie Forschung nach draußen zu vermitteln ist oder wie Forschungsergebnisse anderer hereinzuholen sind. Die Hochschule ist bislang außerstande, diese Kompetenz zu vermitteln. Die Hochschulabgänger, die in die Industrie wechseln, sind durchschnittlich 28 Jahre alt. In diesem Alter ist der Sozialisationsprozeß abgeschlossen, vieles wird dann nicht mehr gelernt. Wenn es Herrn Bamelis gelingt, dennoch ein paar gute Leute aus der Masse der Hochschulabgänger herauszufischen, die zufällig ein Sensorium für Markt und Wirtschaft entwickelt haben, ist das reines Glück. Dieses Manko, die mangelnde Herausbildung von Innovationskompetenz, haben wir noch gar nicht richtig im Visier.

Könnten die Transferbereiche, die jetzt von der Deutschen Forschungsge-



Claus Weyrich studierte Physik an der Universität Innsbruck, wo er 1969 promovierte. Im selben Jahr noch trat er in die Forschungslaboratorien der Siemens AG ein. Seit 1983 hatte er Leitungsfunktionen in den Bereichen angewandte Materialforschung, Materialforschung und Elektronik sowie Basistechnologien; 1994 übernahm er die Leitung der Hauptabteilung „Forschung und Entwicklung Technik", welche die zentralen Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten des Unternehmens umfaßte. Seit 1996 leitet er die Zentralabteilung Technik und ist Mitglied des Vorstandes. Er ist zudem seit 1992 Honorarprofessor an der Technischen Universität München.

meinschaft einrichtet werden, die Entwicklung von Kompetenz für die Praxis voranbringen?

Staudt: Das sind akademische Spielereien. Der Transfer, wie die Wirtschaft ihn braucht, läuft nicht über Vernetzungs- und Informationssysteme. Die Kompetenzen, die im Wettbewerb entscheidend sind, bekommen Sie dort nicht. Ich staune immer wieder über Kollegen, aber auch über Manager aus der Wirtschaft, die mit naiver Gläubigkeit irgend etwas aus vernetzten Systemen aufnehmen, was bestenfalls wertlos, oft sogar desinformativ ist.

Darum meine ich, daß solche mechanischen Vorstellungen von Transfer von den eigentlichen Problemen ablenken. Die Umsetzung von Forschung in Innovation ist ein Entwicklungs- und kein Informationsproblem. Wenn nur Wegweiser aufgestellt werden, dann entspricht das etwa der Transfer-Ideologie, die wir pflegen. Aber mit den Schildern ist noch keine Straße gebaut, die von einem Forschungsergebnis zu einem innovativen und am Markt erfolgreichen Produkt führt.

Das Unternehmen Siemens hat einen riesigen Forschungsapparat. Von außen betrachtet, mutet er wie eine Maschine an, die gut geschmiert ist und von alleine läuft. Welchen Gestaltungsspielraum haben Sie als Forschungsmanager, Herr Weyrich? Können Sie in das Räderwerk gestaltend eingreifen, eigene Akzente setzen und neue Strategien verfolgen?

Weyrich: Ich habe sehr großen Gestaltungsspielraum. Wir müssen in der produktnahen industriellen Forschung nun einmal relativ schnell reagieren und orientieren uns dabei an dem mittel- bis langfristigen Bedarf der einzelnen Unternehmensbereiche; wir schauen also, was jeweils in der Medizintechnik oder in der Chip-Entwicklung – um nur zwei Beispiele zu nennen – heute produziert wird und extrapolieren aus dem Ist-Zustand im Dialog mit den Mitarbeitern des Bereichs, was in den kommenden Jahren an Produkten verbessert werden muß, welche neuen Technologien und neuen Produkte wir gemeinsam in den jeweiligen Bereichen oder in der zentralen Forschung und Entwicklung erarbeiten wollen. In der längerfristig angelegten Forschung habe ich sehr große Gestaltungsfreiräume und kann den Blick auf solche Felder lenken, die wir als lohnend und ertragreich ansehen.

Für den Erfolg meiner Arbeit kommt es aber gar nicht so sehr auf den Freiraum an, den ich selbst habe, um als Forschungsmanager etwa ein bestimmtes Forschungsziel zu definieren. Der entscheidende Freiraum ist derjenige, den ich meinen Mitarbeitern gebe. Und hier möchte ich vor allem von einem unternehmerischen Freiraum sprechen. Es kommt in der Industrieforschung weniger darauf an, wählen zu können, was man tut, sondern mehr, wie man es tut: wie man seine Vorstellungen umsetzt, mit wem man redet, wie man sich in Teams einbindet und zusammenarbeitet. In Freiräumen dieser Art, die ich meinen Mitarbeitern verschaffe, sehe ich eine sehr große Quelle für Motivation, für Kreativität.

Wie lösen Sie das Problem der Kompetenzentwicklung, Herr Bamelis?

Bamelis: Die entscheidenden Fragen sind immer: Forschen wir an den richtigen Themen? Entsprechen sie der Strategie unseres Unternehmens, auf deren Grundlage wir wachsen wollen, um in zehn Jahren an der Spitze zu stehen? Die Antwort ist bei den drei großen „M" zu suchen und zu finden: bei den richtigen Menschen, der richtigen Methodik und – was auf keinen Fall fehlen darf – der Motivation.

Ich glaube daran, daß man in der Forschung so weitgehend wie möglich auf den Menschen, den einzelnen Wissenschaftler setzen soll und ihn fördern muß. Einen Menschen, der Ideen hat, muß man forschen lassen – innerhalb eines Unternehmens selbstverständlich im Rahmen der Geschäftsfelder und -strategien sowie im Rahmen eines vernünftigen Forschungsaufwandes. Auch in der öffentlich geförderten Forschung ist es unsinnig, einen Wissenschaftler zu zwingen, zunächst einmal ganze Bücher vollzuschreiben über das, was er später zu entdecken und zu erfinden hofft, bevor man ihm Geld gibt und ihn arbeiten läßt. Darum finde ich das Verfahren des Fonds der Chemischen Industrie hervorragend und beispielhaft: Der größere Teil des zur Verfügung stehenden Geldes wird einfach Personen zugeteilt, von denen man annimmt, daß sie gute Ideen haben.

Also nicht mit der Gießkanne wahllos Geld über die Forschungsfelder verstreuen, sondern einzelne Pflanzen gezielt fördern und pflegen. Wie macht man das?

Weyrich: Dazu muß zunächst einmal der Boden bereitet werden, damit die noch zarten neuen Pflänzchen auch wachsen können, und es müssen herumtrampelnde Herden vom Forschungsacker entfernt werden, die solche Pflänzchen zertreten. Also wäre da oder dort ein organisatorischer Schutzzaun zu ziehen. Außerdem darf man solche Pflänzchen nicht alle drei Wochen herausziehen, um zu sehen, ob die Wurzeln länger geworden sind; das bringt sie mit Sicherheit um. Man muß also ein wenig Geduld haben.

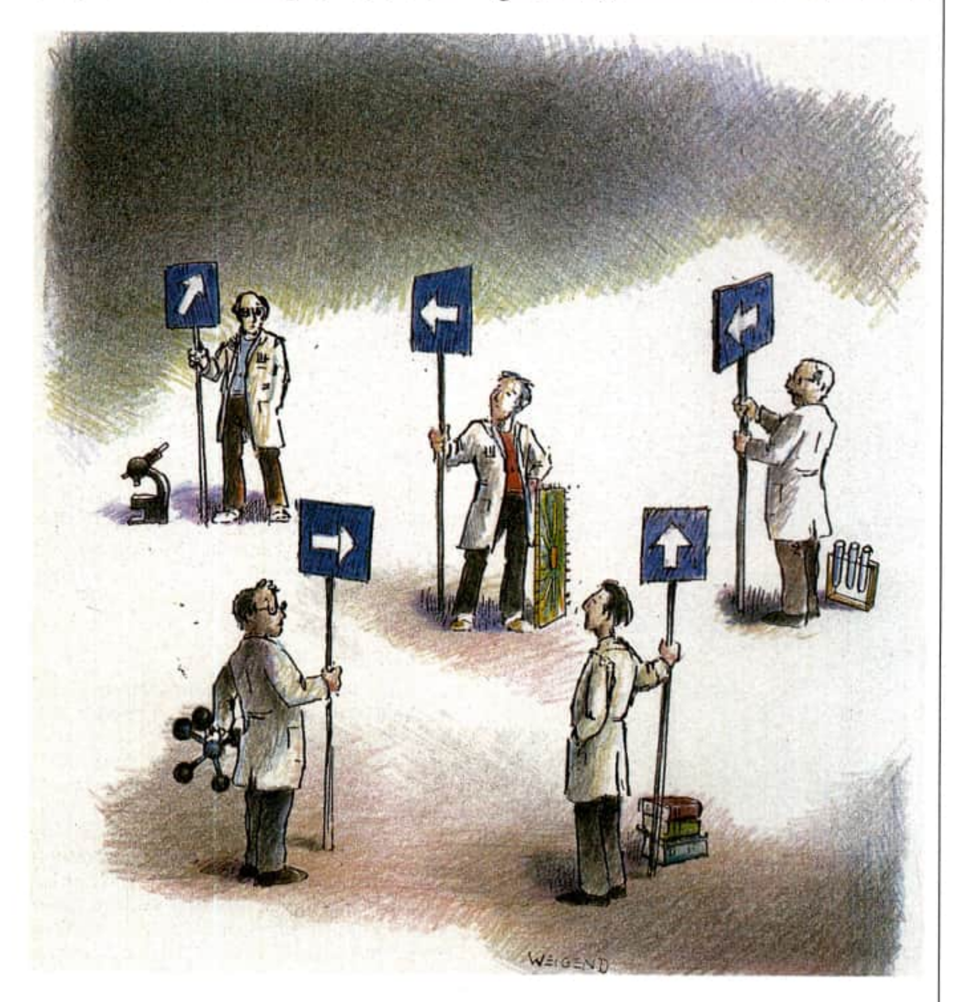
Bamelis: Die deutschen Universitäten müssen sich fragen lassen, ob gute Wissenschaftler gerne in ihnen forschen, ob Ausländer gerne herkommen, weil sie hier internationales Flair atmen können und eine kreative Atmosphäre vorfinden, in der sie sich austoben können. Die deutschen Universitäten müssen dabei akzeptieren, daß sie verglichen und beurteilt werden.

Wenn – wie schon vorgekommen – ein Magazin es wagt, eine Rangliste

deutscher Hochschulen zu publizieren, gibt es noch regelmäßig einen großen Aufschrei. Bei allen Schwächen, die solche Einstufungen haben, finde ich Rankings gut, denn mit ihnen wird etwas angestoßen. Man muß sich an den Universitäten damit auseinandersetzen und kann nicht einfach im vielleicht liebgewordenen warmen Labor verharren.

Um Kompetenz in Deutschland und damit auch den Forschungsstandort zu stärken, halte ich übrigens auch die Leitprojekte für vernünftig, die neue Förderpolitik des Bundesforschungsministers Jürgen Rüttgers. Tatsächlich können meiner Meinung nach gemeinsame Projekte von Wissenschaft und Wirtschaft, Leitprojekte eben, auf nationaler und europäischer Ebene helfen, kritische Masse aufzubauen und konkurrenzfähige Kompetenznetzwerke zu bilden. Der BioRegio-Wettbewerb des Bundesforschungsministeriums, der die Kommerzialisierung in der Biotechnologie, also die Umsetzung biotechnologischen Wissens in Produkte, Verfahren und Dienstleistungen beschleunigen soll, ist in diesem Zusammenhang ein Meilenstein. Ohne solche Leitprojekte, die über den Wettbewerb der besten Ideen definiert werden, würden wir weiter denn jemals davon entfernt sein, in der Biotechnologie den Anschluß an die Weltspitze zu finden. Die im vergangenen August vorgestellten 14 besten Ideen für Leitprojekte im Bereich molekulare Medizin belegen meinen Optimismus.

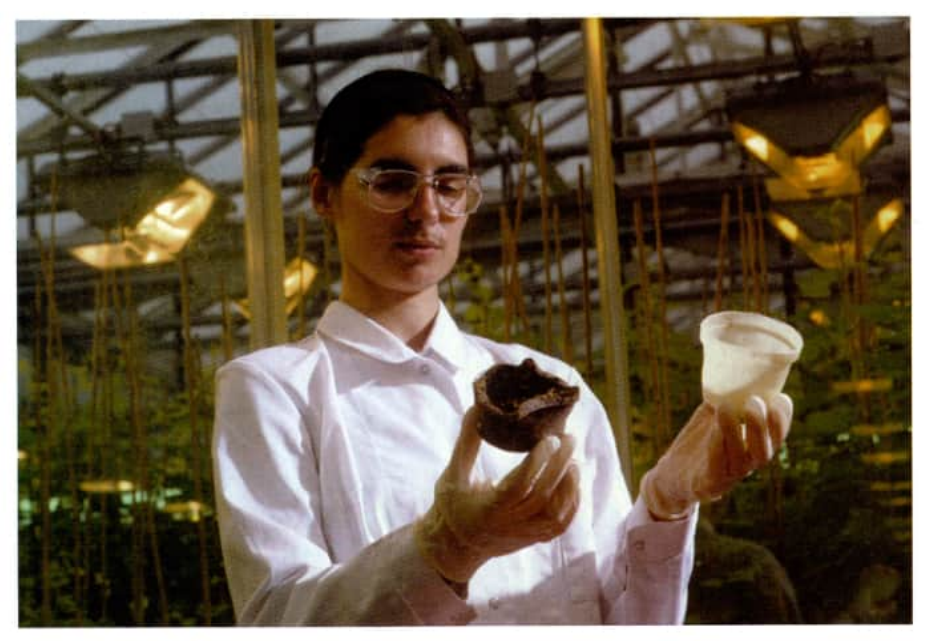
Staudt: Ich erhebe Einspruch. Daß es diese Leitprojekte gibt ist nicht verkehrt. Nur kann das Verfahren so nicht funktionieren. Wer wählt denn die Leitprojekte mit welcher Kompetenz aus? Und welcher wirklich gute Wissenschaftler oder welche wirklich gute Wissenschaftlerin hatte im Sommer 1997 spontan Zeit, sich mit den Wettbewerbsunterlagen zu beschäftigen und dann 10 000 Blatt Papier abzuarbeiten? Ich halte das ganze Unterfangen für eine gefährliche Alibikonstruktion der Politik. Die Steuerung solcher Wettbewerbe und die Qualität der Auswahl müssen stimmen. So etwas darf nicht quasi unter Ausschluß der wirklich guten wissenschaftlichen Öffentlichkeit Deutschlands während der Sommerpause durchgepaukt werden.



Bamelis: Ich finde, es hat sich durchaus etwas getan. Wir dürfen zwar nicht die Illusion haben, daß wir schon dort angekommen wären, wo wir hin wollen;







ohne diese Initiative aber hätten wir meines Erachtens wirklich keine Chance, in der Biotechnologie wenigstens den zweiten Zug zu erreichen, wenn wir den ersten schon verpaßt haben.

Was halten Sie von Minister Rüttgers These, daß Deutschland einmal weltweit die Nummer eins in Biotechnologie sein werde?

Staudt: Das glaubt außer ihm selbst kein Mensch.

Bamelis: Man muß die Ziele immer hoch stecken, das könnte man vielleicht als Ermutigung sagen.

Für zivilisatorisch bedeutsame Innovationen gibt es keinen Fahrplan. Wenn schon in der Bundesrepublik, die mehr von Ideen als von materiellen Ressourcen lebt, zukunftsträchtige Anschlüsse verpaßt werden, muß dann nicht der Staat versuchen, die Forschung zu steuern, oder soll er alles Regeln den Marktkräften überlassen?

Staudt: Wir lieben alle viel zu sehr eine planwirtschaftliche Forschungspolitik; das ist übrigens auch in vielen Unternehmen der Fall. Dahinter steckt ein Denken des „Was wäre schön, wenn...", nicht eines, das danach fragt, wer was kann und was nicht. Eine richtige Beurteilung der Zukunftsperspektiven und -chancen hat eine personelle Orientierung zur Grundlage. Man muß bilanzieren, was man kann und was nicht, und muß dann danach fragen, was man besser kann als andere und was schlechter. Irgendwelche Felder oder Nischen besetzen zu wollen, die in obskuren Gremien oder Delphi-Runden beim Betrachten der Welt ausgemacht und herbeibeschworen werden, kann zwar auch richtig sein. Aber solche Orakel-Ergebnisse sind, wie seinerzeit die Weissagungen der Pythia, immer nur zu 50 Prozent

Die Bayer AG investiert in diesem Jahr rund 3,7 Milliarden Mark – 7,3 Prozent des Umsatzes – in Forschung und Entwicklung. Der Löwenanteil des Budgets entfällt auf das Arbeitsgebiet Gesundheit. So konnten Bayer-Forscher zum Beispiel einen Wirkstoff entwickeln, der die fatalen Folgen der Alzheimerschen Krankheit hinauszögert. Auf dem Monitor im oberen Bild sind die mit dieser Krankheit verbundenen Plaque-Ablagerungen im Gehirn sichtbar. Im mittleren Bild werden Hühner-Küken kurz nach dem Schlüpfen mit natürlicher Darmflora besprüht, die sich dann im Körper der Jungtiere ausbildet und den gefürchteten Salmonellen keinen Platz mehr läßt. Ein Umweltthema in der Bayer-Forschung sind biologisch abbaubare Kunststoffe. Unter Kompostierbedingungen zerfällt der unten gezeigte Pflanzentopf in Biomasse, Kohlendioxid und Wasser.

richtig – und kein Mensch weiß, welche 50 Prozent das sind.

Weyrich: Die Leitprojekte sind schon deswegen zu begrüßen, weil damit eine Art strategischer Rahmen definiert wird. Außerdem wird ein Wettbewerb entfacht, um die Projekte inhaltlich zu konkretisieren. Ich gebe zu, daß dies klingt, als wäre es leichter gesagt als getan; aber ich bin neugierig, was dabei herauskommt.

In diesem Zusammenhang möchte ich noch einmal auf den Wettbewerb eingehen. Zum Beispiel mag ich die von Forschungsplanern häufig benutzten Begriffe Know-how-Transfer oder Wissenstransfer überhaupt nicht – zumal dann nicht, wenn sie als Synonyme für die sogenannte Schnittstelle zwischen öffentlicher und industrieller Forschung herhalten müssen. Der dahinterstehende Gedanke ist doch, daß es so eine Art Ladentisch gäbe, auf den jemand Geld legen kann und dafür FuE-Leistungen erhält.

Der Austausch von Wissen in Forschung und Entwicklung findet heute vielmehr, so möchte ich als Praktiker unterstellen, in kooperativen Strukturen statt, nicht an irgendwelchen Schnittstellen. Diese kooperativen Strukturen erfordern von den Beteiligten die Bereitschaft, etwas zu machen, und von der Leitung, daß sie dieses Machen ermöglicht und unterstützt. Sie erfordern die richtigen Rahmenbedingungen, erfordern Wettbewerb. Aber Wettbewerb macht nur Sinn, wenn der Sieger belohnt wird: Wenn durch die Kooperation zwischen jemandem aus der öffentlichen Forschung und dem Industriepartner die Qualität verbessert wird, ist das Ziel erreicht. Die Währung für High-Tech-Wissen ist nicht Geld, sondern wiederum High-Tech-Wissen. Wenn man kooperationsfähig sein will, muß man etwas zum Tauschen anbieten können.

Hier umzudenken ist meines Erachtens eine der größten Herausforderungen für dieses Land. Damit unterstreiche ich noch einmal, was Herr Staudt gesagt hat, nämlich daß wir uns in der internationalen Konkurrenz auf solche Felder der Forschung und Entwicklung begeben müssen, von denen wir annehmen, daß wir dort auch etwas leisten können – und wo folglich unser High-Tech-Wissen als Währung akzeptiert wird.

Wer soll suchen? Wer soll diese Felder finden? Besteht also doch Handlungsbedarf für die Forschungspolitik?

Staudt: Ich möchte Ihnen als Antwort eine kleine Geschichte erzählen. An einer der Hochschulen, an der ich tätig war, wurde eine Transferstelle eingerichtet. Nach zwei Monaten hatte ich einen dicken Fragebogen auf dem Schreibtisch. „Mit wem kooperieren Sie? Wo kommunizieren Sie? Was machen Sie?" Ich habe geantwortet: „Entweder ich kooperiere weiter, oder ich nehme die Zeit und fülle den Fragebogen aus."

Es ist ziemlich wahrscheinlich, daß diejenigen, die solche Fragebogen ausfüllen, keine Mittel haben, keine Kooperationspartner kennen und hoffen, über diesen Weg Subventionen zu ergattern. Wenn dann noch die Mediokren in den Entscheidungsgremien sitzen, kommt nichts Gescheites zustande; dann werden die kleinen, hoffnungsträchtigen Pflänzchen, von denen Herr Weyrich sprach, niedergetrampelt, und dann wird viel Geld vernichtet. Wie sich Qualität differenzieren läßt? Von mir aus können wir es Wettbewerb nennen.

Weyrich: Genau: nur durch marktwirtschaftliche Mechanismen und Wettbewerb.

Herr Bamelis, Herr Weyrich, wie und wo finden Sie die richtigen Kooperationspartner? Was muß geschehen, damit der Forschungsstandort Deutschland eine Zukunft hat?

Bamelis: Zuallererst muß die Politik an den Universitäten optimale Forschungsbedingungen schaffen, und zwar unter der eben diskutierten Prämisse von mehr Wettbewerb. Des weiteren sollte sie das Geld der Steuerzahler – hier kann man diskutieren, wie groß diese Summe sein müßte – so gut wie möglich investieren. Und wenn sich dabei die Fragen stellen, wo „so gut wie möglich" ist und welches die richtigen Forschungsfelder sind, dann sind für mich die Leitprojekte des Forschungsministeriums eine Antwort darauf.

Mir fällt an der gegenwärtigen öffentlichen Diskussion über den Forschungsstandort Deutschland auf, daß man gelegentlich so tut, als könne man ihn isoliert entwickeln, ihn von dem Produktionsstandort Deutschland völlig entkoppeln. Das funktioniert aber nicht. Wir haben zur Zeit die Situation, daß sich die großen deutschen Unternehmen angesichts steigender Forschungskosten im Inland und im Rahmen der Globalisierung auch auf internationalen Märkten umsehen. Nach einer Untersuchung des Deutschen Instituts für Wirtschaftsforschung in Berlin haben die ausländischen Tochterunternehmen deutscher Firmen 1995 für etwa 8,8 Milliarden Mark geforscht. Nach der Produktion folgt auch die Forschung den Märkten.

Bedauerlicherweise ist es umgekehrt nicht so, daß große Unternehmen aus dem Ausland in die Bundesrepublik kommen wollten. Im Gegenteil, sie machen einen immer größeren Bogen um dieses Land. Eine der Antworten, warum dies so ist, lautet, daß Deutschland als Produktionsstandort – ich spreche jetzt für die chemische Industrie – wenig attraktiv ist. Die Fülle an zu beachtenden Gesetzen und Verordnungen wirkt abschreckend. Hier vor allem ist Deregulierung dringend nötig. Zudem wirkt auch ein anderer Umstand nicht gerade stimulierend auf den ausländischen Investor: In Deutschland herrscht ein unangemessen starker Pessimismus vor; aber Pessimismus und Innovation passen nicht gut zueinander. Über die deutsche Steuerpolitik möchte ich lieber gar nicht reden, doch es ist leider so: Wer in Deutschland in Abschreibungsprojekte – seien es Schiffe oder Wohnungen – investiert, hat steuerliche Vorteile; ein Engagement in Zukunftstechnologie, etwa in einem gentechnologischen neuen Unternehmen, bringt dem Investor hingegen steuerlich nichts.

Stimmen Sie, Herr Weyrich, der These von Herrn Bamelis zu, daß der For-



Pol Bamelis, gebürtiger Belgier, schloß 1963 das Studium der Chemie an der Katholischen Universität Löwen mit der Promotion ab. Seit 1965 ist er für die Bayer AG tätig, zuerst im Wissenschaftlichen Hauptlabor in Leverkusen, später bei der Bayer Antwerpen N. V., im Werk Dormagen sowie wiederum in Leverkusen. Dort übernahm er 1989 die Unternehmensplanung innerhalb der Konzernverwaltung. Seit Mai 1991 ist er Mitglied des Vorstandes der Bayer AG, zudem Mitglied im Vorstandsausschuß „Technik und Umwelt" sowie Vorsitzender des Vorstandsausschusses „Forschung und Entwicklung". Außerdem betreut er das Arbeitsgebiet Agfa.

schungsstandort für die Industrie uninteressant wird, wenn der Produktionsstandort uninteressant geworden ist?

Weyrich: Für mich bedeutet Produktion zunächst einmal mehr als die Fertigung, sie umfaßt die komplette Wertschöpfungskette – von der ersten Ermittlung der Kundenanforderung bis hin zum Recycling des Produkts. Das Schlimmste für Deutschland wäre tatsächlich, hier die Produktion verkommen zu lassen. Alle reden jetzt von unserer Zukunft als der einer Dienstleistungsgesellschaft; aber dabei wird häufig übersehen, daß der größte Markt für Dienstleistungen an die Produktion gekoppelt ist. Und wenn wir für unsere Dienstleistungen im eigenen Land keinen Markt mehr haben, dann wird es in der Zukunft schlecht um uns bestellt sein.

Noch ist es nicht so, daß der Forschungsstandort Deutschland – ich kann das für Siemens sagen – uninteressant geworden wäre. Es wird auch immer wieder pauschal gesagt, die Industrie verlagere die Forschung ins Ausland. Zumindest was mein Haus anbetrifft, ist das so nicht richtig. Richtig ist allerdings, daß wir Forschung und Entwicklung in den letzten zehn Jahren wesentlich stärker im Ausland als in Deutschland aufgebaut haben: Rund 30 Prozent unserer Forschung und Entwicklung finden inzwischen im Ausland statt.

Die allgemein herrschende Tendenz, daß die Wertschöpfung vermehrt dorthin wandert, wo die Märkte am stärksten wachsen, ist nicht aufzuhalten.

Gibt es denn für international oder global operierende Unternehmen derzeit überhaupt triftige Gründe, mit wesentlichen Abteilungen noch in Deutschland zu bleiben?

Weyrich: Sicherlich. Zwar hat der deutsche Standort nun einmal quantitative Nachteile; dazu gehören die Kosten, die enorme Inflexibilität von Arbeitszeiten, die völlig unangemessenen Auflagen für Unternehmen, die investieren wollen, und die äußerst schwerfällige Bürokratie. Der wichtigste Unternehmensfaktor heute ist Zeit, und mit deren Verschwendung sündigen wir, wenn wir jede kleine Aktivität durch Genehmigungsverfahren in die Länge ziehen. Wir haben aber auch einige Vorteile: Es gibt in Deutschland beziehungsweise Europa einen sehr großen, sehr anspruchsvollen Markt...

Staudt: ...Europa ist weltweit der größte Binnenmarkt.

Weyrich: Eben. Und wir Europäer haben einen sehr hohen Lebensstandard. Der Markt ist also ideal für die Absorption von High-Tech-Produkten jeder Art. Wir haben des weiteren politische Stabilität und Geldwertstabilität. Wir haben zudem eine sehr gute Infrastruktur, was Kommunikation, Verkehr und Energie betrifft. Und nicht zuletzt möchte ich die Ausbildung als positiven Standortfaktor anführen, auch wenn besonders im deutschen System hinsichtlich der Internationalisierung noch einiges zu verbessern wäre, das ist unerläßlich und dringlich.

Es gibt also gute Gründe, in Europa, in Deutschland zu produzieren und zu forschen. Trotzdem muß jedes Wirtschaftsunternehmen sich dorthin orientieren, wo es nachhaltig Gewinn erwirtschaften kann. Nun ist es allerdings nicht so, daß wir jeweils dorthin gingen, wo es gerade am billigsten ist. Nach so einfachen Kriterien werden Entscheidungen über Forschungs- und Entwicklungsstandorte nicht getroffen, denn die moderne Struktur der Wertschöpfung ist so komplex, daß wir sie von mehreren Seiten aus optimieren müssen. Wohl spielen Kostenfaktoren eine Rolle, aber ebenso Gesichtspunkte wie Kundennähe, die Logistik oder die Lieferantenbeziehungen. Wichtig ist auch die Nähe zu einem gewissen Wissenspool. Nehmen wir als Beispiel die Vereinigten Staaten: Wer mit Multimedia groß werden will, muß einfach in die USA gehen. Wir in Deutschland haben unsere Stärken zum Beispiel in der Energietechnik, in der Kommunikationstechnik, in der Automatisierungs- und in der Umwelttechnik.

Eine blühende Wirtschaft in den neuen Bundesländern läßt noch auf sich warten. Minister Rüttgers hat vor Jahresfrist die Wirtschaft aufgefordert, mehr in die ostdeutsche Industrieforschung zu investieren. Nach Angaben des Deutschen Industrie- und Handelstages wird sie dort überwiegend vom Mittelstand getragen, der jedoch unter erheblichem Kapitalmangel leidet. Bieten sich nicht Kooperationen mit Großunternehmen an, um die Situation zu verbessern? Siemens zum Beispiel hat in Dresden ein Halbleiterwerk errichtet – ist daraus eine fruchtbare Kopplung von Produktion und Forschung entstanden?

Weyrich: Das Werk in Dresden ist zur Zeit die modernste Halbleiterfertigungsstätte unseres Unternehmens. Diese Standortwahl hat eine Menge High-Tech-Arbeitsplätze geschaffen – nicht nur in dem Werk selber, sondern in der Zulieferindustrie mindestens noch einmal doppelt bis dreimal so viele ebenfalls sehr anspruchsvolle Arbeitsplätze.

Bei der Rekrutierung der Mitarbeiter gibt es selbstverständlich eine Rückkopplung zu den Hochschulen, die diese Nachfrage entsprechend in der Ausbildung berücksichtigen. Durch Kooperation von kleinen und mittelständischen Unternehmen mit der großen Firma Siemens finden zudem auch die Know-how-Flüsse statt, von denen wir sprachen.

Nun ist allerdings der Standort Dresden nicht typisch. Wo gar keine Produktion ist, da kann auch keine Forschung wachsen. Dennoch muß man sich meines Erachtens von der Vorstellung lösen, daß neues Wissen ausschließlich nur an Orten entstehen könne, die sich in Rufweite einer Firma befinden. Wissen – konkreter: wirtschaftlich verwertbares Wissen – entsteht überall in der Welt. Hier kommt die Rolle der Politik noch einmal ins Spiel: Sie kann ein für Investoren attraktives Umfeld schaffen. Das

Silicon Valley in Kalifornien zum Beispiel prosperiert ja nicht deshalb, weil dort die Leute so besonders intelligent wären – es prosperiert vor allem, weil die Leute, die dort in eine Idee investieren, wissen, daß sie, wenn sie erfolgreich sind, auch sehr reich werden können. Wenn die Politik Firmengründungen unterstützen möchte, sollte sie besonders diesen Punkt beachten.

Staudt: Unsere Diagnose der neuen Bundesländer ist unehrlich. Wir hatten vor und nach der Vereinigung einen Wanderungsschub von 1,5 Millionen Menschen und etwa die gleiche Zunahme an Langzeitarbeitslosen in Westdeutschland. Der Produktivitätsschub der westdeutschen Wirtschaft in der ersten Hälfte der neunziger Jahre resultiert zu einem nicht unerheblichen Teil aus diesem Kompetenzschub aus dem Osten. Wenn Sie aus einer Population 20 bis 30 Prozent der mobilen und agilen Menschen abziehen, können Sie von der allein gelassenen Restpopulation nicht die große Dynamik erwarten. Das erleben wir jetzt. Dies wird zum Generationenproblem. Ich habe immer davor gewarnt, nach naiv technokratischer oder planwirtschaftlicher Manier Geld in die verbliebenen älteren Restforscher zu investieren, die sich schon als unbeweglich erwiesen haben. Es gab tatsächlich eine so dumme Programmorientierung im Forschungsministerium, die jemandem Geld verschaffte, nur weil er das Ostfähnchen heraushängte, die aber andernorts qualifiziertere Stellen vernachlässigte. So vergeudet man Geld. So schafft man keine Innovation.

Allerdings steigt die Attraktivität der neuen Bundesländer für Forschung und Entwicklung zur Zeit sehr. Es entwickelt sich dort eine neue Infrastruktur. Vor ein paar Jahren noch war kaum ein junger Mensch, selbst wenn er hier arbeitslos war, in den Osten zu bewegen. Inzwischen findet eine Rückwanderung in dem Umfang statt, in dem in Westdeutschland ein Überhangpotential entsteht. Die Marktwirtschaft funktioniert auch hier.

Warum engagiert sich die Industrie so zurückhaltend in den neuen Bundesländern, statt dessen aber an so vielen anderen Orten in der Welt?

Staudt: Einen Grund hat Herr Weyrich genannt: Ein Unternehmen muß seine Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten zunehmend marktnah ansiedeln. Ich möchte hinzufügen, daß die These vieler Ökonomen, der zufolge man Wertschöpfungsanteile – insbesondere in der Forschung – weltweit völlig frei und willkürlich einfach verschieben könne, intellektuell zwar reizvoll ist, daß sie aber nur von Leuten aufgestellt werden kann, die nichts von der Sache verstehen. So ist es einfach nicht.

Eine andere Seite dieses Problems habe ich vorhin schon angedeutet. Wenn es stimmt, daß die deutsche Forschung und Entwicklung weltweit nur mit zehn Prozent am Schöpfungsprozeß für neues Wissen beteiligt ist, dann muß sie versuchen, andernorts vorhandenes Know-how anzuzapfen. Deshalb ist es meiner Meinung nach absolut richtig, wenn sich deutsche Medizintechnik in Kalifornien niederläßt, um vom dort vorhandenen Wissen zu profitieren.

Ich konnte eigentlich diese etwas nationalistisch gefärbte Diskussion in Deutschland um die Abwanderung der Forschung nie nachvollziehen: Da wird immer nur beklagt, daß deutsche Wissenschaftler weggehen. Die Herausforderung ist doch, wie wir sie wieder zurückbekommen können. Wie hoch sind die Anreize für Wissenschaftler, die an einem anderen Ort in der Welt Know-how erworben haben, wieder hierher zurückzukehren? Es geht darum, einen Fluß von Wissen auf dem internationalen Spielfeld zu unserem Nutzen zu erzeugen.

In Stanford und Berkeley wurden vor einigen Jahren viele Taiwanesen und Japaner ausgebildet. Sie haben inzwischen die Dynamisierung ihrer Wirtschaft geschafft, inzwischen gehört ihnen sogar einiges von den Unternehmen in Kalifornien. Kurzum, ihr Aufenthalt im anderen Land erklärt zu einem Teil die Dynamik in der Wirtschaft und auch in der Forschung. In der Bundesrepublik hingegen tun wir immer noch so, als lebten wir in einer *splendid isolation*: „Deutsche Forschung ist Spitze und wird dann direkt neben der Hochschule, im Gewerbepark, schon die richtigen Innovationen erzeugen“. Das ist Unsinn.

Welche Kur würden Sie verschreiben wollen?

Staudt: Mein Rezept ist, die Kompetenz dafür zu verstärken, international tätig sein zu können. Das geschieht nicht – weder in den Wirtschafts- noch in den Naturwissenschaften. Wir bilden immer noch nach den Ideologien des 19. Jahrhunderts aus. Unsere angehenden Wissenschaftler werden auf die Realität in der Welt nur mangelhaft vorbereitet.

VW will nach eigenen Angaben in der konzerneigenen Forschung die Sonne nicht mehr untergehen lassen. Das Ziel ist, Forschungs- und Entwicklungsarbeiten an aktuellen Projekten weltumspannend rund um die Uhr laufen zu lassen.



Erich Staudt studierte Physik sowie Wirtschafts- und Sozialwissenschaften in Mainz und Erlangen-Nürnberg, wo er 1973 promovierte und sich 1978 habilitierte. Von 1978 bis 1986 hatte er den Lehrstuhl für Betriebswirtschaftslehre mit dem Schwerpunkt Planung und Organisation an der Universität Duisburg inne; seit 1986 hat er den Lehrstuhl für Arbeitsökonomie an der Ruhr-Universität Bochum inne. Außerdem leitet er seit 1982 das Institut für angewandte Innovationsforschung (IAI) Bochum e.V. Seine Forschungsschwerpunkte liegen im Grenzgebiet von Technik, Ökonomie und ihren sozialen Implikationen.

Staudt: Weltweite Forschung ist ein sehr komplexer Verteilungsprozeß, der nicht mit schlichten Logiken zu beherrschen ist. Zu beschließen, einen Entwicklungsprozeß rund um die Welt zu organisieren und alle sechs Stunden irgendwo den Stab weitergeben zu lassen wie im Staffellauf, das kann einmal in einem begrenzten Segment funktionieren, aber nicht prinzipiell. In allen Betrieben, die solche virtuellen Strukturen schon haben, erleben wir eines: Das Experimentieren endet in einem Trümmerhaufen.

Wir haben gerade ein Medienzentrum in Duisburg etabliert. Selbst die Protagonisten des Teleworking mittels Computers und Telephonleitung sind schließlich dort eingezogen, denn sie haben gemerkt, daß sie vor allem eines müssen: von Angesicht zu Angesicht zusammensitzen, damit sie eben diesen Kompetenz- und Erfahrungsaustausch vornehmen können, über den wir gesprochen haben. Insofern ist der Standort nach wie vor ein potentieller Cluster – der freilich nur so attraktiv ist, wie er kompetentes Personal bietet.

Gibt es dieses kompetente Personal in Deutschland?

Staudt: Wir haben zur Zeit rund 80 000 arbeitslose Naturwissenschaftler und Ingenieure. Aber nicht nur diese, sondern auch die Wissenschaftler, die eine Beschäftigung gefunden haben, weisen ein typisch deutsches Manko auf: Wir haben an unserem Institut am Beispiel von Chemikern herausgefunden, daß sie zwar hochqualifiziert sind – aber im angesprochenen Sinne inkompetent. Die deutsche Wissenschafts- und Bildungspolitik hat dieses Phänomen überhaupt noch nicht zur Kenntnis genommen, sondern repariert am Ausbildungssystem des letzten Jahrhunderts herum.

Herr Bamelis, welche Qualitäten außer den rein fachlichen muß ein junger Chemiker mitbringen, um in Ihrem Unternehmen einen Arbeitsplatz zu finden?

Bamelis: Herr Staudt hat mit dieser These von der Inkompetenz der Naturwissenschaftler ja viel Aufregung erzeugt . . .

Staudt: Unsere Untersuchung bezog sich auf Chemiker, aber das Ergebnis gilt auch für andere Naturwissenschaftler.

Bamelis: Ich habe festgestellt, daß die Professoren in Deutschland mindestens ebenso viel, wenn nicht noch mehr über diese Dinge diskutieren als ihre Kollegen in allen anderen Ländern Europas; mir scheint also das entsprechende Problembewußtsein vorhanden zu sein. Jedoch wie immer im Leben ist es am schwierigsten, nicht nur über etwas zu reden, sondern etwas zu tun. Nachwuchswissenschaftler, die wir suchen, müssen nicht allein exzellente Chemiker, sondern auch Unternehmer sein. Sie müssen mit Personal umgehen können, strategisch zu planen vermögen, in Sicherheitsfragen Bescheid wissen und vieles mehr. Ich plädiere also dafür, daß alles, was zur Zeit laut und ausführlich diskutiert wird, endlich umgesetzt wird.

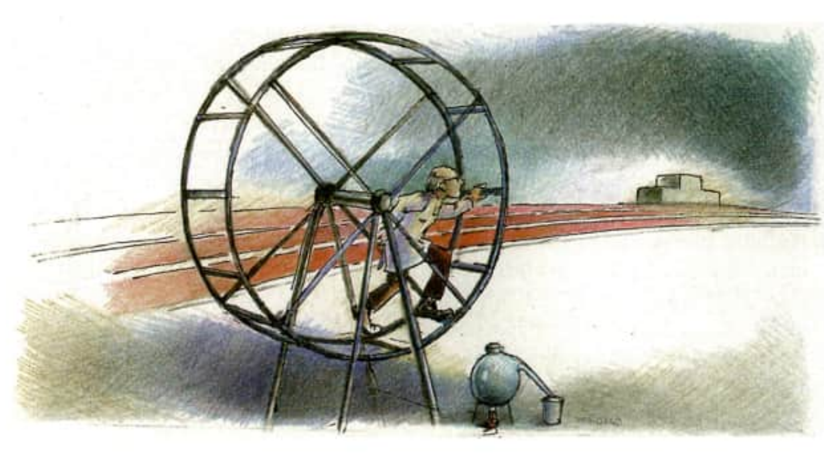
Weyrich: Ich erwarte Fortschritte von der laufenden Hochschulreform. Der Staat muß die Regeln, die Rahmenbedingungen neu schaffen, und die müssen deutlich leistungsorientiert sein. Dann wird sich das System von allein in eine zukunftsfähige Richtung entwickeln.

Wirtschaftskrise und Arbeitslosigkeit lasten auf Deutschland. Jungakademiker versuchen verzweifelt, ihr Wissen irgendwo anwenden zu können. Eine Chance für sie wird immer wieder in Existenzgründungen vermutet. Läßt sich der Mut, sein eigener Unternehmer zu werden, in der Ausbildung vermitteln?

Staudt: Wir diagnostizieren bei jungen Leuten, gleichgültig ob sie die mittlere Reife, das Abitur oder einen Hochschulabschluß haben, ein erhebliches Praxisdefizit. Daß der Bezug zur beruflichen Praxis in den Ausbildungsgängen ausgeschlossen wird, was gerade in den letzten Jahren in Mode gekommen ist in Deutschland, das ist das zentrale Hindernis für diese jungen Leute, eine eigene Existenz zu gründen. Sie sind zu theoretisch, meist zu spezialisiert, mithin falsch ausgebildet.

Darum gefällt mir die Idee immer besser, einen höheren Anteil an Dualisierung in die Hochschulreform einzubringen. Die rein wissenschaftliche Ausbildung ist gut an den Hochschulen aufgehoben; aber praktische Anteile, die es einem Wissenschaftler erst ermöglichen, einen Beruf auszuüben, müßten wesentlich stärker berücksichtigt werden.

Da ist die Wirtschaft im Obligo. Leider zeigt sie zur Zeit für ein Engagement in der Hochschulausbildung kein Interesse. Aber Praxis vermag die Hochschule nicht zu lehren. Kein Kurs in Management kann die praktische Anschauung, die praktische Erfahrung ersetzen. Denn Kompetenz besteht nicht nur aus diesem expliziten Wissen, sondern vor allem aus gewonnener Erfahrung. Die jungen Leute, die schließlich mit 28 Jahren und Doktortitel auf den Arbeitsmarkt kommen, haben nie Erfahrung sammeln können, weder im Klein- noch im Großbetrieb. Und unsere Betriebspraktika sind zu dürftig. Die duale Ausbildung hat in Deutschland im gewerblichen Bereich eine gute Tradition. Dieses Modell auf einem anderen, höheren Niveau anzuwenden könnte meines Erachtens sehr fruchtbar sein.



Könnte die Industrie mehr Praxis für Studenten anbieten?

Bamelis: Ich wäre schon sehr zufrieden, wenn die Chemiestudenten an den Universitäten Seminare besuchen müßten, in denen sie lernten, etwa die Herstellungskosten eines Produkts in der chemischen Industrie zu berechnen. Das wäre ein großer Schritt vorwärts. Ein gänzlich duales Hochschulsystem zu etablieren und das Studium ins Unternehmen zu verlagern, das erscheint mir nicht realistisch.

Sind die Ausbildungssysteme anderer Länder in dieser Hinsicht besser?

Staudt: Zumindest haben andere Länder nicht diese extrem lange akademische Ausbildung. In den USA wird zudem – zum Beispiel für den Abschluß Master of Business Administration – eine Mischung aus theoretischer Ausbildung und Praxiserfahrung verlangt. Wir müssen in Deutschland in einem wesentlich früheren Lebensabschnitt den Praxisbezug herstellen. Ob die Mischung aus diesen beiden Säulen sequentiell oder in einem dualen Modell vermittelt wird ist im Prinzip gleichgültig.

Weyrich: Wenn auch die Lehre den Regeln des Wettbewerbs unterläge, würden die Studenten dorthin gehen, wo sie die beste Ausbildung bekommen. Und woran werden sie die beste Ausbildung messen? Nun, daran, daß sie nachher im Industrie- und Wirtschaftsleben die besten Aussichten haben. Sie werden es schätzen lernen, wenn sie an der Hochschule zusätzlich betriebswirtschaftliches Grundwissen erwerben können, in Projektmanagement unterwiesen werden, ein Auslandssemester bekommen oder den Unterricht in englischer Sprache erhalten. Sie werden merken, daß die Ausbildung an solchen Universitäten sie so profiliert, daß ihre Chancen auf Erfolg im Beruf enorm wachsen.

Der Schlüssel, den der Staat in der Hand hält, lautet Wettbewerb in der öffentlichen Forschung, sowohl in der Grundlagenforschung wie im industrienahen Bereich, wo Engagement und gute Kooperation belohnt werden müssen. Warum kann man nicht die Leistungen der öffentlichen Forschung, die anwendungsnah und wirtschaftlich zum Beispiel für klein- und mittelständische Betriebe verwertbar sind, angemessener gewichten? Dazu muß der Staat Flexibilität

schaffen und unternehmerische Freiräume. Da muß man auch einmal Unkonventionelles zulassen. Wer in der Forschung Spitzenleute haben will, darf ihnen nicht irgendein Fixum nach dem Bundesangestelltentarif bieten, sondern muß für besondere Fälle Sonderlösungen schaffen. Und wenn ein Unternehmer selbst in Forschung und Entwicklung investiert, dann sollte er entsprechende Steuererleichterungen bekommen. Das ist doch so einfach, warum macht man das nicht? Klein- und mittelständische Unternehmen würden sich prompt stärker engagieren, weil es dann für sie attraktiver wäre.

Wenn man schon die Ausgaben für Forschung und Entwicklung im Verhältnis zum Bruttoinlandsprodukt bemißt, dann unterstellt man doch, daß Forschung und Entwicklung mit Wirtschaftswachstum in einem Zusammenhang stehen. Ihre Förderung sollte also marktwirtschaftlich geregelt werden, dann bewirkt man etwas.

Ist dies die Quintessenz: Der Staat soll doch gestaltend eingreifen, indem er Wettbewerb forciert?

Staudt: Im gestaltenden Bereich hat der Staat keine Chance. Seine Reichweite ist denkbar gering. Die Frage ist nicht, was er soll, sondern was er kann. Er kann zwar relativ wenig machen; aber das, was er kann – den Wettbewerb forcieren –, macht er nicht.

Bamelis: Wir brauchen eine industrie- und innovationsfreundliche Gesellschaft. Spitzenforschung erhält man nur durch Menschen, die eine entsprechend erstklassige Ausbildung erhalten haben, und durch die richtigen Themen.

Weyrich: Nur wenn sich in der Gesamtheit etwas ändert, wird es bei uns eine Verbesserung geben – selbst dann nicht von heute auf morgen. Aber ich bin optimistisch.

Das Gespräch führten Hartmut Altenmüller, Dieter Beste und Marion Kälke.

Innovativer Mittelstand – Gemeinschaftsforschung kleiner und mittlerer Unternehmen

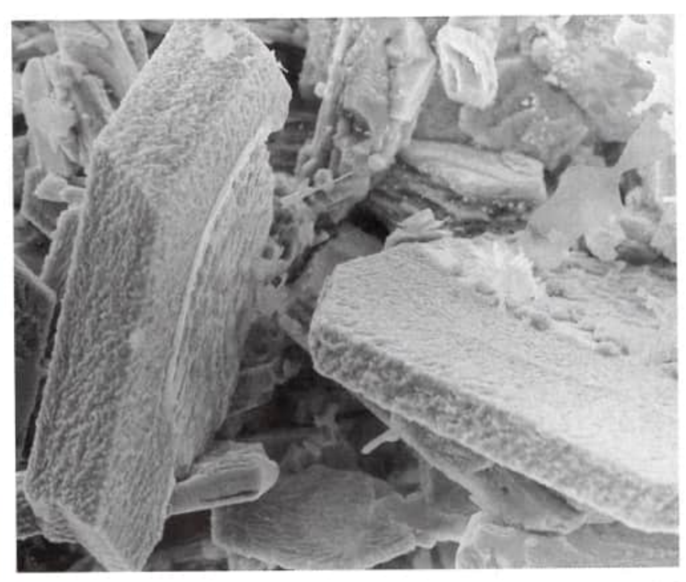
Von Hans Wohlfahrt

Das Kürzel KMU umfaßt 99,6 Prozent aller Unternehmen in der Bundesrepublik: die kleinen und mittleren mit jeweils maximal 500 Beschäftigten. Rund 70 Prozent aller Arbeitnehmer unseres Landes sind in ihren Betrieben tätig. Allein in der Zeit von März 1994 bis März 1995 haben KMU 287 000 neue Stellen eingerichtet, während bei den größeren Unternehmen im gleichen Zeitraum 329 000 Stellen abgebaut wurden. Ihre offenkundige Funktion als Rückgrat der deutschen Wirtschaft kann die mittelständische Industrie jedoch in Zukunft nur dann ausfüllen, wenn sie auch weiterhin ihre nationale – und im Zuge der Globalisierung der Wirtschaft zunehmend auch internationale – Wettbewerbsfähigkeit durch innovative Ideen zu erhalten und zu steigern vermag.

Beim Thema Industrieforschung denkt man trotzdem vornehmlich an Großunternehmen, die (nicht selten massiv öffentlich gefördert) in eigenen FuE-Abteilungen neue Verfahren und Produkte entwickeln. Das mag darin begründet sein, daß gerade KMU erhebliche Schwierigkeiten haben, solche Grundlagen des Fortschritts aus eigener Kraft zu erarbeiten und spektakuläre Ergebnisse etwa auch der institutionalisierten öffentlichen Forschung in ihre Praxis umzusetzen. Den Unternehmen dieser Größenordnung fehlt es dafür schlichtweg an Mitarbeitern und Ressourcen. Zu diesen strukturbedingten Nachteilen kommen relativ höhere FuE-Kosten als bei Großunternehmen hinzu, außerdem schwer überschaubare FuE-Risiken und der große Aufwand bei der Umsetzung verwertbarer technologischer Konzepte.

In der Bundesrepublik gibt es jedoch ein hochwirksames Instrument, mit dem mittelständische Unternehmen diesem gravierenden Wettbewerbsnachteil entgegenwirken können: Rund 50 000 KMU haben in den verschiedenen Branchen und Technologiefeldern der Wirtschaft Gruppierungen gebildet, die ge-





Die AiF fördert die industrielle Gemeinschaftsforschung von rund 50 000 kleinen und mittleren Unternehmen. Im Karl-Winnacker-Institut der Deutschen Gesellschaft für Chemisches Apparatewesen, Chemische Technik und Biotechnologie (DECHEMA) e.V. in Frankfurt, einer AiF-Mitgliedsvereinigung, können zum Beispiel Oberflächenuntersuchungen an Werkstoffproben mit einem hochauflösenden Rasterelektronenmikroskop bei simultaner Analyse der in der Probe vorhandenen Elemente vorgenommen werden.

meinsam forschen. Mittlerweile entstanden 109 derartige Verbünde; ihre Dachorganisation ist die bereits 1954 gegründete Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke" (AiF).

Damit bietet sich auch kleinen und mittleren Unternehmen die Chance, kritische Schwellen bei einzelnen FuE-Vorhaben zu überwinden und bestimmte technologische Entwicklungslinien mit zu verfolgen. Weil dabei vielfach Konkurrenten zusammenarbeiten, ist Wettbewerbsneutralität ein wesentliches Merkmal der Kooperation.

Die Grundlage dieses Systems bilden freilich die einzelnen Unternehmen selbst. Aus ihrer täglichen Arbeit sind die konkreten Probleme, die es zu lösen gilt, am besten bekannt. Sie können im Rahmen der jeweiligen Vereinigung Ziele und Schwerpunkte der Projekte bestimmen; das garantiert größtmögliche Praxisrelevanz, Anwendungsnähe und rasche Nutzung der Ergebnisse. Von anderer Seite, zum Beispiel von wissenschaftlichen Instituten, werden die Vorhaben lediglich beratend begleitet.

Der Bundesminister für Wirtschaft fördert diese industrielle Gemeinschaftsforschung mit einem jährlich festgesetzten Betrag. Gegenwärtig – für 1997 – sind es 170 Millionen Mark. Dafür fordert das Ministerium allerdings den Einsatz von Eigenmitteln in mindestens gleicher Höhe; sie sind jedoch nicht als anteilige Übernahme von Ausgaben für die öffentlich geförderten Vorhaben zu erbringen, sondern können von den Mitgliedsvereinigungen der AiF flexibel und nach eigenem Ermessen verwendet werden – zum Beispiel für Forschungsvorhaben in eigener Regie oder zum Unterhalt von Branchenforschungsinstituten.

Die Bedeutung des Netzwerks für die Leistungsfähigkeit des deutschen Mittelstandes zeigt sich deutlich im zunehmenden Engagement der beteiligten Industrie. Ihre finanziellen Aufwendungen dafür sind nämlich nicht nur erheblich höher als nach den Förderungsbedingungen erforderlich, sondern werden seit geraumer Zeit sogar um durchschnittlich rund zehn Prozent jährlich gesteigert. Bei einem gesamtwirtschaftlichen Anstieg der industriellen FuE-Ausgaben von 1,8 Prozent in diesem Jahr ist dies ein höchst überproportionales Wachstum.

Insgesamt ist das Verhältnis von industrieeigenen und öffentlichen Mitteln mittlerweile besser als 2 zu 1, denn im zuletzt ausgewerteten Jahr 1995 brachten die Partner der Kooperativen mehr als 400 Millionen Mark auf. Trotzdem schieben die AiF und ihre Mitgliedsvereinigungen bereits rund 400 FuE-Projekte, die für die Förderung durch das Wirtschaftsministerium bewilligungsreif sind, vor sich her: Sie können mangels öffentlicher Mittel nicht durchgeführt werden, obwohl ihre technologische Relevanz für den Mittelstand unbestritten ist. Zwar sind 170 Millionen Mark Fördermittel insbesondere zu Zeiten knapper öffentlicher Haushalte viel Geld, aber bei 50 000 Mitgliedern der AiF-Forschungsvereinigungen eben auch nur durchschnittlich 3400 Mark pro Unternehmen im Jahr.

Da große Konzerne mehr und mehr Produktionsbetriebe und zunehmend auch FuE-Abteilungen ins Ausland verlagern, sollte Wirtschaftspolitik hierzulande mehr denn je Mittelstandspolitik sein, denn kleine und mittlere Unternehmen bleiben dem Standort Deutschland treu. Effektive Hilfe zur Selbsthilfe muß sie zu existenzsichernden Innovationen befähigen. Die industrielle Gemeinschaftsforschung im Rahmen des AiF-Systems bietet dazu das geeignete Instrumentarium.



Die Papiertechnische Stiftung (PTS) in München ist eines der 59 Branchenforschungsinstitute in der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF). Im Bild eine Versuchsstreichmaschine. Im Rahmen von Forschungsarbeiten auf dem Gebiet gestrichener Papiere werden in der PTS unter anderem unterschiedliche Streichfarbrezepturen getestet. Streichen, also die ein- oder beidseitige Beschichtung mit Dispersionen aus Farbpigmenten und Bindemitteln, ist ein geläufiges Veredelungsverfahren, beispielsweise um das Papier besser bedruckbar zu machen.

Diplom-Ingenieur Hans Wohlfahrt, Geschäftsführer der Zwickauer Kammgarn GmbH, ist Präsident der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke" (AiF), Sitz Köln.

Archimedes. Das Wissenschaftsmagazin von ARTE.
Jeden Dienstag, 20.00 Uhr.





Dienstag, 4. November

Archimedes Spezial: Rassismus
Archimedes beweist, daß die genaue Unterscheidung zwischen einzelnen Hautfarben nicht begründet ist, sondern auf höchst subjektiven Wahrnehmungen beruht.

Dienstag, 11. November

Einstieg in die Materie: Kohlefaser • Geschmackssachen • Warum ist der Himmel eigentlich blau? • Alain Prochiantz: Die Finanzierung der Forschung • „Mission Expresso“ – Eine Gruppe von Wissenschaftlern kommt dem Treibhauseffekt auf die Schliche • Bibliographie

Dienstag, 18. November

Einstieg in die Materie: Polymere • Schlammlawine • Wie entstand das Mittelmeer? • Antoine Andremont: Resistenz der Bakterien • Mündliche Matheprüfung • Bibliographie

Dienstag, 25. November

Flug der Heuschrecke • Das gläserne Labor der Meeresbiologin von Baltimore • Porträt eines Nobelpreisträgers: Kary Mullis

Gentherapie: nicht-virale Strategien

Etliche Probleme des Gentransfers mittels Viren ließen sich vielleicht durch künstlich verpackte oder sogar nackte DNA umgehen. Untersuchungen an Patienten zufolge könnten sich diese nicht-viralen Systeme außer für die Behandlung von Krankheiten auch für Impfungen eignen.

Von Philip L. Felgner

Viele Bemühungen, zu therapeutischen Zwecken Gene in menschliche Zellen einzuschleusen, stützen sich auf modifizierte Viren. Gute Transfermöglichkeiten bieten Viren deshalb, weil sie darauf spezialisiert sind, sich an bestimmte Typen von Zellen zu heften und ihr Erbgut samt Fracht effizient ins Zellinnere zu bringen.

Allerdings ist ihr medizinischer Einsatz als Genfähre, als Vektor, nicht unproblematisch (Spektrum der Wissenschaft, Oktober 1997, Seite 50). So bauen manche Viren ihr Genmaterial an beliebiger Stelle in die Chromosomen der befallenen Zellen ein, was Schäden verursachen kann. Ferner bestehen Bedenken, daß sich abgeschwächte, gewissermaßen entschärfte Viren im Körper unerwünscht verändern und dann wieder Krankheiten auszulösen vermögen. Eine ernste Einschränkung bedeuten zudem mögliche Immunreaktionen, die sich gegen das Trägervirus aufbauen und es selbst oder die von ihm infizierten Zellen unter Umständen zerstören, ehe die Therapie überhaupt hätte greifen können.

Aus all diesen Gründen sind Forscher schon seit langem bestrebt, ein therapeutisches Gen ohne infektiöse Agenzien zu transferieren. Und das um so mehr, als sich in den letzten Jahren gezeigt hat, daß viele der Leiden, die letztlich für eine Gentherapie in Frage kommen dürften, wiederholte Behandlungen erfordern (eine einmalige, auf Dauerheilung ausgerichtete Prozedur kann nur funktionieren, wenn die zu verändernden Zellen sich im Körper selbst regenerieren, statt nach einiger Zeit abzusterben). Nicht-virale Verfahren könnten sich dafür besonders gut eignen, weil man Immunreaktionen vermeidet, die dem wiederholten Einsatz von Viren entgegenstehen.

Ein Ansatz, der inzwischen an Menschen erprobt wird, basiert auf Komplexen aus DNA und nicht-immunogenen Lipiden (das sind fettartige Moleküle, die keine Abwehr auf den Plan rufen). Erste klinische Tests gibt es auch zu einer verblüffenden Entdeckung der letzten Jahre: daß die simple Injektion nackter DNA in einen Muskel die Produktion eines darauf codierten Proteins veranlassen kann. Dies ist besonders im Hinblick auf neue Impfstoffe vielversprechend.

Eine Frage der Abstoßung

Schon vor Jahrzehnten hatte Forscher die Möglichkeit fasziniert, Zellen durch Einschleusen fremder DNA in spezieller Weise zu verändern. Bereits Mitte der fünfziger Jahre zeigten John Holland von der Universität von Kalifornien in San Diego und mehrere andere Wissenschaftler, daß Zellen Nucleinsäuren (RNA oder DNA), die man aus Viren isoliert hatte, aufnehmen und die darauf enthaltene genetische Information ausprägen können. In Analogie zur Infektion sprach man von Transfektion (benutzt wurde der Begriff schließlich auch für die Übertragung jeglicher freier funktionstüchtiger DNA in Zellen).

Die Effizienz der Prozedur ließ allerdings zu wünschen übrig. Als ein wichtiger Faktor, der die Aufnahme gereinigter DNA in Zellen behinderte, erwies sich im folgenden Jahrzehnt der Umstand, daß das Molekül in einer wäßrigen Lösung – wie die Flüssigkeit um die Zellen im Körper oder in einer Kulturschale sie ist – negative elektrische Ladungen trägt. Weil Membranen von Zellen ebenfalls negativ geladen sind, wird freie DNA gewöhnlich abgestoßen. Man entwickelte deshalb Methoden, das Molekül durch Zusatz von Chemikalien elektrisch zu neutralisieren und so leichter aufnehmbar zu machen. Ein solcher Zusatz ist DEAE-Dextran, ein Kohlenhydratpolymer mit angekoppelten positiv geladenen Diethylaminethyl-Gruppen. Als noch geeigneter erwies sich die Co-Fällung von DNA mit Calciumphosphat; der feine Niederschlag wird dann Zellen in einer Kulturschale zugesetzt.

Mit diesen Methoden ließ sich belegen, daß kultivierte menschliche Zellen fremde Gene aufnehmen und dauerhaft ausprägen können. Schlagend demonstrierte dies unter anderem ein Versuch mit Zell-Linien, deren Gen für das Enzym Thymidinkinase defekt war: Wenn ihnen ein entsprechendes Gen aus dem Herpes-simplex-Virus als Calciumphosphat-Komplex zugesetzt wurde, produzierten einige Zellen schließlich beständig das Enzym.

In den späten siebziger Jahren fiel der Startschuß für die moderne Biotechnologie-Industrie. Man hatte Methoden entdeckt, einzelne gentragende DNA-Fragmente aus Zellen zu isolieren und in Plasmide einzusetzen; solche umbaubaren zusätzlichen DNA-Ringe aus Bakterien werden in ihren Herkunftszellen von Natur aus vermehrt – und mit ihnen

das in sie eingebaute Gen. Diese Rekombinationstechnik ermöglichte es, die interessierende DNA in beliebiger Kopienzahl zu erzeugen, zu klonieren.

Paul Berg und seine Kollegen von der Universität Stanford (Kalifornien) verknüpften nun das Verfahren mit einer anschließenden chemischen Transfektion: Sie übertrugen rekombinante, aus Bakterien gewonnene Plasmide auf diesem Wege in kultivierte Säugetierzellen. Da Gene in höheren Zellen gewöhnlich nur unter Mitwirkung von Proteinen im Zellkern ausgeprägt werden können, mußten einige der sie tragenden Plasmide wohl dorthin gelangt sein. Nach diesem Prinzip wurden dann viele der Säugerzell-Linien hergestellt, welche die Industrie heutzutage zur Produktion medizinisch wichtiger rekombinanter Proteine verwendet, darunter des Faktors VIII; er fehlt Blutern mit der klassischen Form der Erkrankung, der Hämophilie A.

Lipidsysteme

Trotz der kommerziellen Bedeutung chemischer Transfektionsmethoden erachteten die meisten Forscher sie als zu ineffektiv für eine Gentherapie. Aber Berg und Demetrios Papahadjopoulos von der Universität von Kalifornien in San Francisco sowie Claude Nicoloau von der Medizinischen Fakultät der Harvard-Universität in Cambridge (Massachusetts) gelang es, Zellen

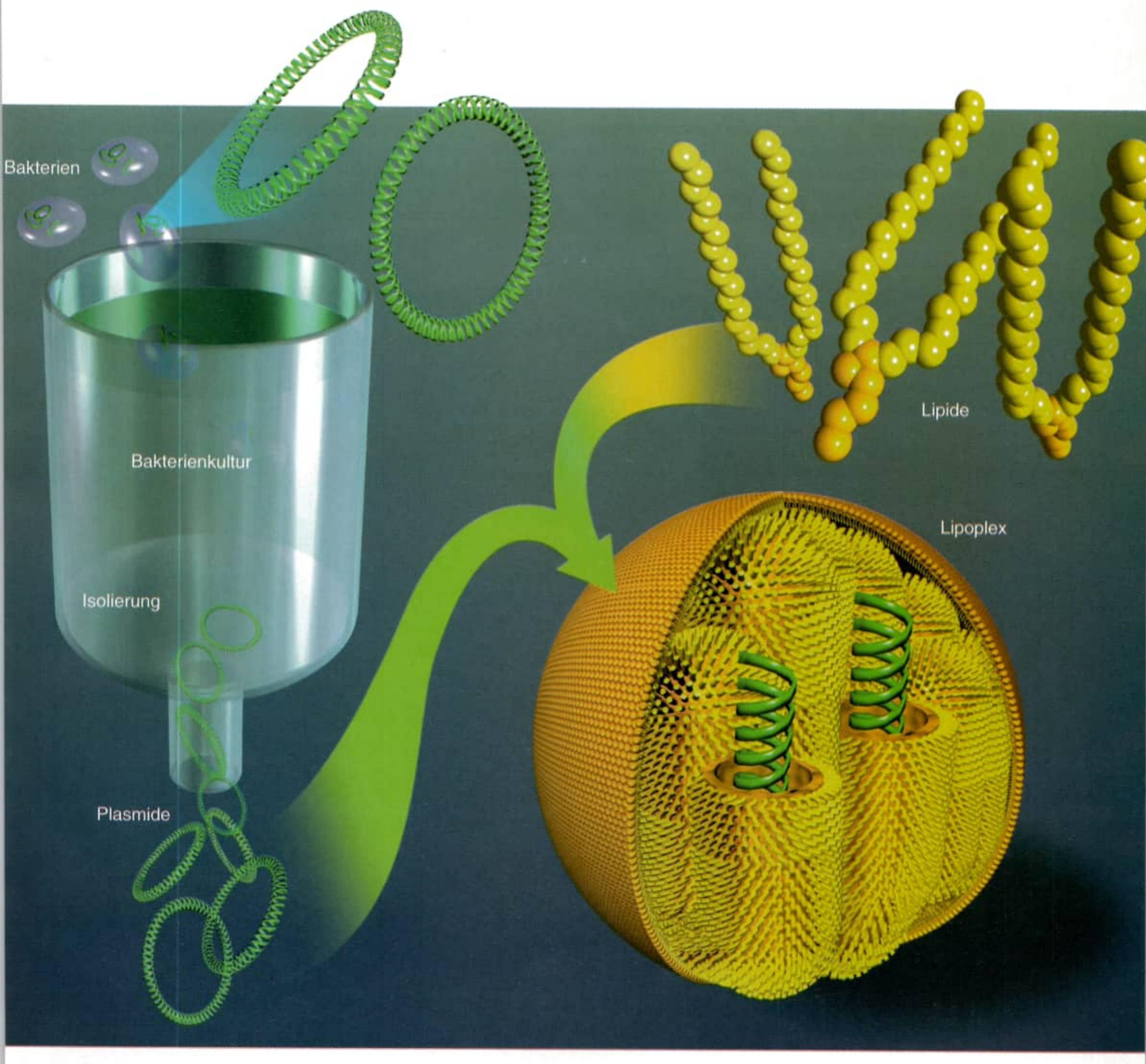


Bild 1: Prinzip der Herstellung von Lipoplexen für die experimentelle Gentherapie. Plasmide – kleine DNA-Ringe – mit eingebauten therapeutischen Genen werden in Bakterienzellen vervielfältigt, daraus isoliert und dann mit speziellen Lipiden vermischt, die eine positive Ladung tragen. Diese fettartigen Moleküle lagern sich um die negativ geladene DNA. Die oft entstehenden schlauchartigen Gebilde können sich zu einem kompakten Partikel mit einer äußeren Lipidwandung auffalten. Lipoplexe sind somit komplizierter gestaltet als gewöhnliche Liposomen, die lediglich von einer zweischichtigen Lipidmembran umhüllte Bläschen sind.

auch mittels plasmidhaltiger Liposomen erfolgreich zu transfizieren. Das sind winzige Kügelchen mit einer Membran aus Lipiden (Fetten) als Schale und einer wäßrigen Lösung im Inneren. Beschrieben wurden sie erstmals in den sechziger Jahren von Alex D. Bangham vom Babraham-Institut in Cambridge (England).

Liposomen können sich von selbst formieren, wenn man besondere Lipide – solche mit wasserliebendem Kopf und wassermeidendem Schwanz – in wäßriger Lösung aufschwemmt: Die Moleküle ordnen sich zu doppelschichtigen, sandwich-artigen Membranen, bei denen die Köpfe der äußeren Schicht zum umgebenden wäßrigen Milieu weisen und die der inneren Schicht ins ebenfalls wäßrige Zentrum. Auch die Plasmamembran tierischer Zellen hat diese Struktur; und deshalb vermutete man schon seit längerem, Liposomen könnten mit der Zellmembran verschmelzen und somit ihren Inhalt direkt ins Zellinnere freisetzen. Das machte sie als mögliche Spediteure für medizinisch bedeutsame Stoffe interessant.

Experimente verliefen zwar ermutigend, waren mit Plasmiden jedoch nicht rasch in eine praktische Anwendung umsetzbar: Der innere Durchmesser eines Liposoms ist mit etwa 0,025 bis 0,1 Mikrometer (tausendstel Millimeter) wesentlich kleiner als ein typisches gentechnisches DNA-Plasmid im unverknäulten Zustand. Wegen dieses Mißverhältnisses wurden in einem Reaktionsansatz jeweils nur wenige, fest verdrillte Plasmide in sich bildende Liposomen eingeschlossen.

Einige Optimisten glaubten aber an Verbesserungsmöglichkeiten. Während meiner Tätigkeit für das Unternehmen Syntex Research in Palo Alto (Kalifornien) überlegten wir uns im Kollegenkreis, daß Liposomen sowohl mit DNA und RNA als auch mit Zelloberflächen leichter in Wechselwirkung treten sollten, wenn ein Teil der üblichen Lipide durch solche mit einer positiven Ladung am wasserliebenden Ende ersetzt war. Damals – 1983 – waren jedoch nur wenige positiv geladene (kationische) Lipide bekannt, die zugleich die richtige Gestalt haben, um sich zu Liposomen organisieren zu können.

Wir synthetisierten deshalb abgewandelte Lipide nach unseren Maßgaben. Die Moleküle verhielten sich wie erwartet, und die daraus gebildeten kationischen Liposomen banden sich fest an die Oberfläche von kultivierten Zellen. Mehr noch: Wenn wir die Plasmide einfach mit etwa dem Achtfachen ihrer Masse an kationischen Lipiden mischten, wurde praktisch die gesamte in Lösung vorhandene DNA eingefangen. Ich war über-

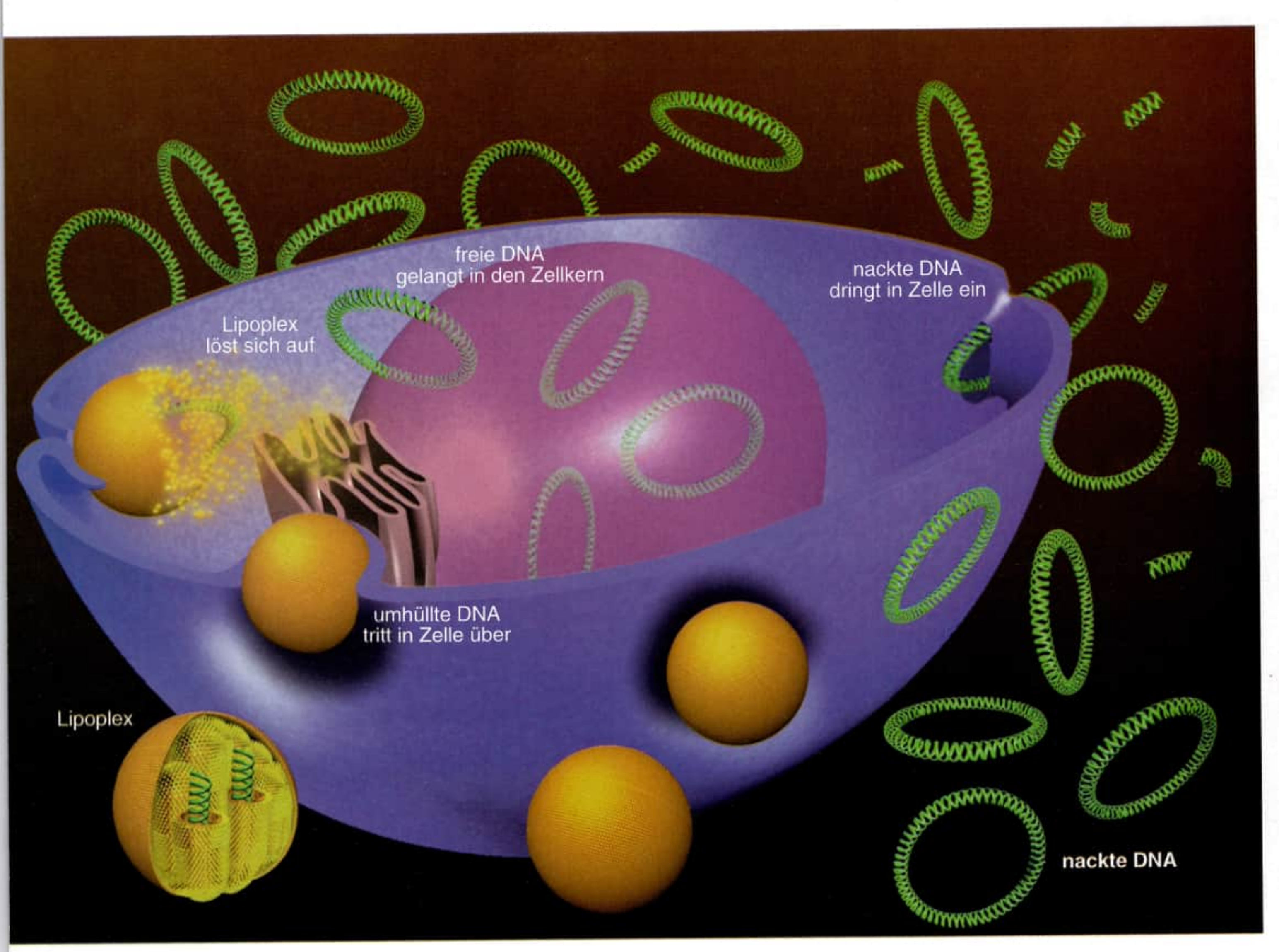


Bild 2: Die Lipide der Lipoplexe helfen DNA beim Eintritt (vorne und links). Nach Auflösung des Gebildes werden sie von Organellen aufgenommen. Wenn alles gutgeht, gelangen die nun freien Plasmide in den Zellkern, wo ihr Gen abgelesen werden kann. Auch nackte DNA-Plasmide, die man in ein Gewebe injiziert, dringen gelegentlich in eine Zelle ein, wohl durch feine Risse (rechts).

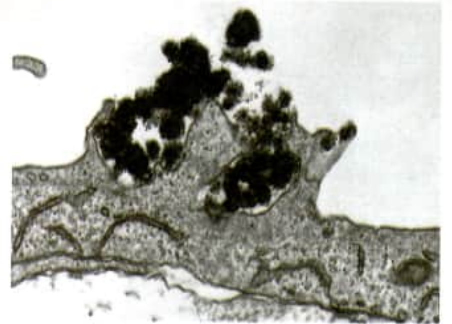
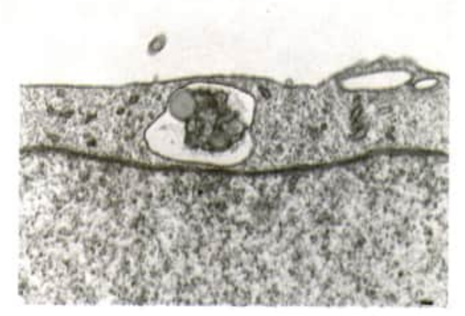




Bild 3: Diese elektronenmikroskopischen Aufnahmen zeigen, wie ein Lipoplex (dunkle Masse) von einer kultivierten Zelle aufgenommen wird (nur ihr Randbereich ist abgebildet). Die Lipidmoleküle schützen die DNA-Fracht vor zellulären Abbau-Enzymen.

rascht, wie leicht sich Bedingungen hatten herstellen lassen, unter denen physikalisch stabile Komplexe entstehen.

Die sich in der Mischung formierenden Strukturen sind freilich variabler und komplizierter als einfache Liposomen. Oft findet man zum Beispiel Plasmide, die in röhrenförmige Lipidgebilde eingeschlossen sind; unter den richtigen Bedingungen kann sich dann ein solcher Schlauch zu einem kompakten Partikel mit einer Lipidwand auffalten (Bild 1). In dieser Form ähnelt das Ganze in gewisser Weise manchen Viren. Da sich die Gebilde, die aus kationischen Lipiden entstehen, so stark von einfachen Liposomen unterscheiden, hat man sich in der Fachwelt vor kurzem auf einen neuen Namen für sie geeinigt: Lipoplexe.

Ich hatte erwartet, daß man Lipoplexe erst noch weiter verändern müßte, bevor sie ihre Fracht ins Zellinnere befördern könnten. Erstaunlicherweise jedoch transfizierten sie, wie einer meiner Praktikanten feststellte, einen signifikanten Anteil der Zellen (Bilder 2 und 3).

Das Vermischen von kationischen Lipiden mit DNA ist mittlerweile ein Standardverfahren für den Gentransfer in kultivierte Zellen. Viele eigens für diesen Zweck hergestellte Präparationen sind bereits kommerziell erhältlich.

Klinische Studien

Vor kurzem hat man begonnen, Lipoplexe am Menschen zu erproben. Bei der ersten Therapie im Versuchsstadium ging es darum, Gene für B7 einzuschleusen; dieses Oberflächenprotein ist ein sogenanntes co-stimulatorisches Signal für bestimmte Abwehrzellen. Wenn sie es zusammen mit Tumor-Antigenen auf Krebszellen erkennen, sollten sie die – an sich körpereigenen – Zellen als fremd werten und gezielt zerstören.

Bei klinischen Versuchen, die das von mir in San Diego (Kalifornien) mitbegründete Unternehmen Vical finanziell unterstützte, bekamen mehr als 90 Krebspatienten, die auf Standardbehandlungen nicht angesprochen hatten, Lipoplexe mit DNA für B7 in ihre Tumoren injiziert. In den meisten Fällen wurde dadurch die Produktion des Proteins veranlaßt. Allein 60 der Patienten hatten maligne Melanome (schwarzen Hautkrebs); bei etwa jedem dritten schrumpfte der behandelte Tumor oder verschwand gänzlich (Bild 5).

Melanome im fortgeschrittenen Stadium neigen allerdings stark zur Metastasierung, so daß eine Behandlung der äußerlich sichtbaren Geschwülste meist keine Heilung bringen dürfte. Aber unseren ermutigenden vorläufigen Ergebnissen zufolge könnten Lipoplexe dennoch hilfreich sein: Manchmal schrumpften sogar jene Tumoren eines Patienten, die keine solche Injektion erhalten hatten (im Tierexperiment greifen die einmal aktivierten Abwehrzellen auch gleichartige Krebszellen an, die kein B7 tragen). Bei anderen klinischen Studien mit Lipoplexen, die das *B7*-Gen enthalten, soll die Sicherheit (Unschädlichkeit) und Wirksamkeit einer entsprechenden Behandlung bei inoperablem Krebs von Dickdarm, Niere und Brust ermittelt werden.

Vical unterstützt ferner eine klinische Studie mit dem Gen für Interleukin-2 (IL-2). Dieses Immunhormon wird in Form von Infusionen bei Nierenkrebs verabreicht, was jedoch schwere toxische Nebenwirkungen hat. Mit Hilfe genhaltiger Lipoplex-Präparationen, die in einen solchen Tumor injiziert werden, dürften sich lokal hohe, die Abwehr anregende Konzentrationen von IL-2 aufbauen, zugleich aber die meisten toxischen Nebenwirkungen vermeiden lassen.

Das US-Unternehmen Genzyme General Division erprobt Lipoplexe zur Behandlung der cystischen Fibrose; bei dieser im deutschen Sprachraum als Mukoviszidose bekannten Erbkrankheit schädigen zähflüssige Drüsensekrete insbesondere die Lungen. Ursache ist ein defekter Ionenkanal in der Zellmembran (siehe Spektrum der Wissenschaft, Februar 1996, Seite 32). Die Liposomen mit dem intakten Gen werden in Form eines Aerosolsprays in die Lungen eingeatmet, wo das schließlich hergestellte Kanalprotein einige der schlimmsten Symptome lindern sollte.

Verbesserung der Prototypen

Mit Lipoplex-Präparaten läßt sich im Tierexperiment manchmal eine vergleichbar starke Gen-Expression erreichen wie mit viralen Genfähren. Die Übertragung ist allerdings wesentlich weniger effizient: Einige Viren transferieren ihr Erbgut mit einer Ausbeute von fast 100 Prozent; um aber eine bestimmte Anzahl von Zellen mit Lipoplexen zu



Bild 4: Nackte Plasmid-DNA wurde hier nach intramuskulärer Injektion von Muskelzellen einer Maus aufgenommen und ausgeprägt. Sie trug zum Sichtbarmachen des Effekts ein Gen für ein Protein, das eine deutlich blaue Färbung verursacht.

transfizieren, braucht man etwa das Zehntausendfache an derart präparierten Kopien des Gens.

Wir und andere Wissenschaftler suchen deshalb in die äußere Hülle spezielle Proteine (oder Teile davon) einzubauen, ähnlich jenen, mit denen Viren an bestimmte Zelltypen andocken. Als weitere Zusatzausstattung kommen Moleküle in Frage, die Gene vor dem Abbau in Zellen schützen und ihnen das Funktionieren erleichtern. Dafür bieten sich zum Beispiel sogenannte Membranfusionsproteine von Viren an, die mit Hilfe dieser Moleküle gewöhnlich dem Abfallbeseitigungssystem im Zellinneren entschlüpfen. Außerdem versucht man, therapeutische Gene mit speziellen viralen Proteinen zu verknüpfen, die virale Gene zum Zellkern dirigieren helfen – denn nur dort kann die Information abgelesen werden.



Bild 5: Am Medizinischen Zentrum der Universität von Michigan in Ann Arbor bekommt eine Melanom-Patientin Lipoplexe mit einem Gen injiziert, dessen Produkt das körpereigene Abwehrsystem auf die Krebszellen aufmerksam machen soll.

Nackte DNA

Gleichzeitig untersuchen wir, ebenso wie andere Wissenschaftler, Anwendungsmöglichkeiten für nackte DNA. In den späten achtziger Jahren, lange bevor klinische Studien mit Lipoplexen begannen, hatten wir nämlich eine überraschende Entdeckung gemacht.

Eigentlich wollten wir herausfinden, welche Lipidpräparate sich am besten für die Genübertragung in Körpergewebe eignen; dazu wurden Lipoplexe mit einem Gen, dessen Expression leicht nachzuweisen war, in verschiedene Gewebe von Mäusen injiziert. Es war ein denkwürdiger Tag, als die Analyse unseres ersten Experiments verriet, daß wir in der Skelettmuskulatur einen vergleichbar hohen Expressionslevel erreicht hatten wie im günstigsten Fall bei der Transfektion von kultivierten Zellen. Die nächste Beobachtung kam jedoch völlig unerwartet: Auch DNA allein, wie wir sie bei einigen Versuchen als Kontrolle verwendet hatten, brachte annähernd gleiche, teils sogar bessere Ergebnisse als die Lipidpräparate.

Wir wiederholten diese Experimente mehrmals in den verschiedenen Labors der beteiligten Wissenschaftlergruppen – immer mit demselben Ergebnis: Nackte DNA, in den Skelettmuskel eines Tieres injiziert, wurde exprimiert; die lokale Konzentration des produzierten Proteins war mit bis zu 100 Nanogramm pro Gramm Muskelgewebe zudem recht hoch (Bild 4).

Trotz der elektrischen Abstoßung zwischen Zelloberfläche und DNA können demnach einige wenige Zellen das Molekül aufnehmen – wie allerdings, ist bis heute unklar. Vielleicht spielt dabei eine geringfügige Gewebeverletzung oder ein erhöhter Druck an der Injektionsstelle mit (Bild 2 rechts).

Im Prinzip schien es somit auch beim Menschen möglich, nackte DNA intramuskulär zu injizieren, die dann therapeutisch ausreichende Mengen eines gewünschten Proteins liefern würde. Dringend nötig sind neue, bessere Darreichungsformen zur Behandlung von Diabetes-Patienten mit Insulin oder von Blutern (Hämophilen) mit den Gerinnungsfaktoren VIII oder IX. Allerdings hätten die bei den frühen Studien erreichten hohen lokalen Proteinkonzentrationen noch nichts gegen diese Krankheiten ausrichten können, weil die aus dem Muskel freigesetzte Menge in den drei Litern Plasma des Blutes zu stark verdünnt worden wäre.

Dank verbesserter Plasmide haben meine Kollegen und ich in der letzten Zeit Fortschritte gemacht. So können geeignete nackte Plasmide mit dem Gen für Erythropoietin bei Mäusen die Bildung roter Blutkörperchen anregen. Dieses Hormon erhalten beispielsweise Patienten, die sich regelmäßigen Dialysen unterziehen müssen; ihre geschädigten Nieren können es oft nicht in ausreichender Menge herstellen, so daß das Knochenmark zu wenig rote Blutkörperchen produziert. Auch nach einer Chemo- oder Strahlentherapie von Krebs, die das Knochenmark und damit das blutbildende System schädigt, nutzt das Hormon. Vielleicht wird künftig einmal die intramuskuläre Injektion ähnlicher rekombinanter Plasmide eine preiswertere Alternative zur Verabreichung von Erythropoietin selbst sein, das man aufwendig mit Hilfe gentechnisch veränderter Säugerzellen erzeugen muß.

DNA-Impfstoffe

Der Verwirklichung näher scheint der Einsatz nackter DNA als Impfstoff, da schon winzige Mengen eines Erregerproteins eine schützende Immunantwort auszulösen vermögen. Es gibt zwei Hauptformen der Immunität: Die erste – die humorale – wird durch Antikörper vermittelt, die zweite hingegen durch Abwehrzellen, die befallene Körperzellen attackieren; erkannt werden diese an Bruchstücken fremder Proteine, die sie auf ihrer Oberfläche präsentieren. Deshalb – so die Überlegung von Dennis A. Carson von der Universität von Kalifornien in San Diego und mir – sollte nackte Plasmid-DNA, deren Produkt ja dann in Muskelzellen erzeugt wird, auch eine zelluläre Immunität bewirken können.

Unser erstes Experiment gemeinsam mit Gary M. Rhodes ergab, daß Mäuse nach Injektion eines Plasmids, das für ein Hüllprotein des menschlichen Immunschwächevirus (HIV) codiert, Antikörper gegen diesen Eiweißstoff des AIDS-Erregers produzierten. Mehr noch – zelluläre Immunreaktionen wurden, wie Rhodes anschließend zeigte, ebenfalls ausgelöst. In Labortests griffen spezielle Abwehrzellen dieser Tiere Zellen an, die Fragmente des HIV-Proteins präsentierten.

Der krönende Abschluß ähnlicher Experimente mit Grippeviren gelang Suezanne E. Parker aus meinem Labor. Sie belegte, daß ein Plasmid mit einem Gen dieser Erreger als DNA-Vakzin Mäuse später vor einer ansonsten tödlichen Virusdosis zu schützen vermochte. Margaret Liu und ihre Kollegen an den Forschungslaboratorien des Unternehmens Merck in West Point (Pennsylvania) haben diese Ergebnisse ausgebaut und eine Reihe von potentiellen DNA-Vakzinen entwickelt, die eine lange anhaltende zelluläre und humorale Immunantwort hervorrufen. Derzeit laufen klinische Studien mit einem solchen Grippe-Impfstoff.

DNA-Vakzine gegen die Erreger von Herpes-Erkrankungen, Malaria und AIDS dürften wohl in absehbarer Zeit ebenfalls reif für klinische Tests sein. Auf längere Sicht anvisieren könnte man auch solche gegen Tuberkulose-Bakterien, Papillom-Viren (die unter anderem im Verdacht stehen, Gebärmutterhalskrebs zu fördern), Clamydien (Erreger der sogenannten Vierten Geschlechtskrankheit und der Ägyptischen Augenkrankheit) und Hepatitis-Viren (die infektiöse Gelbsucht, Leberzirrhose und sogar Krebs verursachen).

Außer zur Prävention von Infektionen ließen sich DNA-Vakzine möglicherweise ferner zur gezielten Aktivierung des Immunsystems gegen Krebszellen bereits erkrankter Personen einsetzen. Ein entsprechender klinischer Versuch ist für Lymphome, einen Krebs der weißen Blutkörperchen, in Planung. Das Vakzin enthält ein Gen für ein Molekül auf der Oberfläche der jeweils entarteten Zellen des Patienten.

Lipoplexe und nackte DNA sind keineswegs die einzigen nicht-viralen Methoden für eine Gentherapie. Untersucht werden auch verschiedene kationische Polymere, die keine Lipide sind und die mit DNA Komplexe bilden. Diese als Polyplexe bezeichneten Gebilde haben sich im Labor und in klinischen Versuchen als vielversprechend erwiesen.

Perspektiven

Ein wichtiges Ziel der Anstrengungen zur nicht-viralen Gentherapie ist die Entwicklung von Transportsystemen, die sich ins Blut injizieren lassen und ihre DNA-Sequenzen gezielt zu bestimmten Geweben oder Organen wie Lunge, Leber, Milz oder Knochenmark verfrachten. Präparate, die man als Tablette oder Kapsel schlucken kann, wären sogar noch bequemer. Insbesondere ließe sich die Krebsbehandlung, wenn solche Systeme nur entartete und nicht die normalen Zellen eines Gewebes ansteuerten, in verschiedener Hinsicht verbessern. Schließlich sollte man sogar einmal mutierte Gene in den Zellen von Menschen mit Erbkrankheiten oder Krebs direkt korrigieren können – auf genchirurgischem Wege. Eine Methode, die gezielte Genveränderung, bietet einen möglichen Ansatz; in Zellkultur hat man sie bereits erfolgreich mit Lipoplexen als Vehikel erprobt.

Die nicht-virale Genübertragung mit Hilfe von Lipoplexen, Polyplexen und nackter Plasmid-DNA ist mittlerweile ein bedeutendes, expandierendes Feld in der pharmazeutischen Forschung und Entwicklung. Bei weiteren raschen Fortschritten sollte in den nächsten Jahrzehnten eine Vielzahl von Produkten, die auf dieser Technologie basieren, routinemäßig zur Behandlung und Vorbeugung verbreiteter Krankheiten eingesetzt werden können.

Philip L. Felgner ist leitender Wissenschaftler bei dem Unternehmen Vical in San Diego (Kalifornien). Nach seiner Promotion in Biochemie an der Staatlichen Universität von Michigan in East Lansing hat er noch Lipid-Biophysik an der Universität von Virginia in Charlottesville studiert. Im Jahre 1982 trat er bei dem Unternehmen Syntex Research in Palo Alto (Kalifornien) ein und begründete sechs Jahre später Vical mit. Musik dient ihm zur Entspannung; er spielt selber klassische Gitarre.

Literaturhinweise

Direct Gene Transfer into Mouse Muscle in Vivo. Von Jon A. Wolff, Robert W. Malone, Phillip Williams, Wang Chong, Gyula Acsadi, Agnes Jani und Philip L. Felgner in: Science, Band 247, Seiten 1465 bis 1468, 23. März 1990.

Direct Gene Transfer for Immuno-Therapy. Von G. J. Nabel und P. L. Felgner in: Trends in Biotechnology, Band 11, Heft 5, Seiten 211 bis 215, Mai 1993.

DNA Vaccines. Von J. J. Donnelly, J. B. Ulmer, J. W. Shiver und M. A. Liu in: Annual Review of Immunology, Band 15, Seiten 617 bis 648, 1997.

Lipidic Vector Systems for Gene Transfer. Von R. J. Lee und L. Huang in: Critical Reviews in Therapeutic Drug Carrier Systems, Band 14, Heft 2, Seiten 173 bis 206, 1997.

Das zähe Leben von Schrödingers Katze

Ein berühmtes Gedankenexperiment wies schon in den dreißiger Jahren auf den problematischen Zusammenhang von Quantenphysik und Makrowelt hin. Neueste Laborversuche untersuchen nun im Detail, wie die vertrackten Phänomene der Mikrophysik in die vertraute Welt des Alltags übergehen.

Von Philip Yam

Angeblich bedauerte Erwin Schrödinger (1887 bis 1961) einmal im Gespräch, daß er sich jemals mit Quantentheorie eingelassen habe – obwohl er für seine bahnbrechende Leistung auf diesem Gebiet 1933 mit dem Nobelpreis ausgezeichnet worden war. Das Unbehagen an den seltsamen Konsequenzen dieser Theorie, die das Verhalten von Atomen, Elektronen, Photonen und anderen submikroskopischen Objekten zu beschreiben vermag, artikulierte der österreichische Physiker 1935 mit einem berühmten Gedankenexperiment, bei dem eine Katze zusammen mit einer Giftphiole und einem radioaktiven Atom in eine Kiste gesperrt wird.

Nach den Gesetzen der Quantenmechanik können Mikropartikel übergangslos von einem Ort zum anderen springen, sich an mehreren Stellen gleichzeitig aufhalten und einander mit Überlichtgeschwindigkeit beeinflussen. Warum verhalten sich Katzen – oder Tennisbälle, Planeten und Menschen – nicht ebenso? Schließlich sind sie aus Atomen zusam-

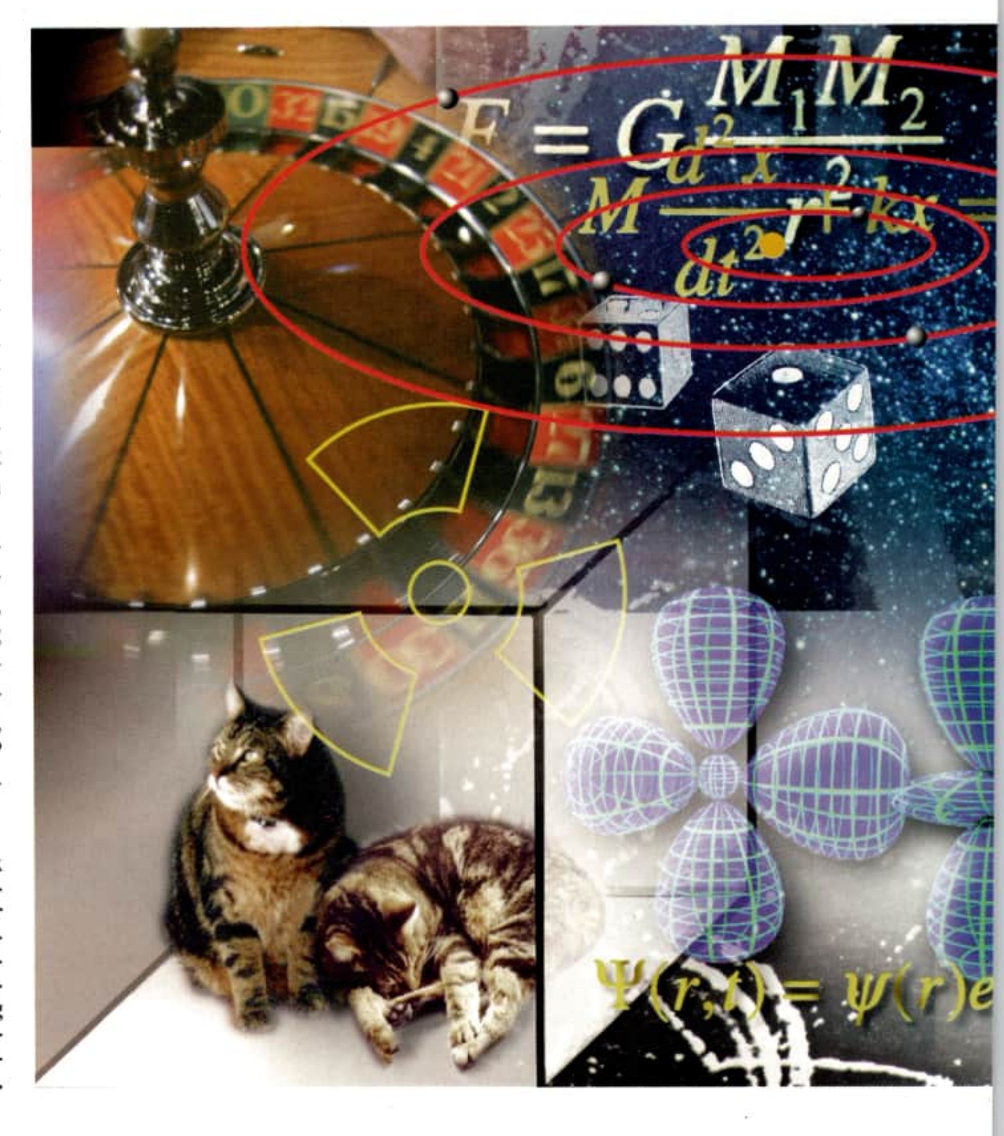


Bild 1: Das Theoriegebäude der Physik muß irgendwie die Exotik der Quantenmechanik – Superpositionen lebendiger und toter Katzen, seltsam geformte Elektronenbahnen, interferierende Materiewellen und Energiequanten – mit der vertrauten klassischen Physik in Verbindung bringen: Zufallswahrscheinlichkeiten, Planetenbahnen, schwingende Pendel und Interferenzstreifen im Doppelspalt-Versuch.

mengesetzt. Doch bekanntlich gehorchen makroskopische Objekte den vertrauten Regeln der schon von Isaac Newton (1643 bis 1727) formulierten klassischen Mechanik. An welchem Punkt geht aber dann die Quantenwelt in die der alltäglichen Erfahrung über (Bild 1)?

Mit dieser Frage befassen sich seit kurzem Experimentalphysiker in ausgeklügelten Laborversuchen. Indem sie Teilchen mit Laserstrahlen quasi einfrieren oder durch spezielle Hohlräume schicken, verwirklichen sie an der Grenze von Mikro- und Makrowelt winzige Versionen von Schrödingers Katze: Sie bringen einzelne Elektronen oder Atome dazu, sich an zwei Orten gleichzeitig aufzuhalten, oder sie versetzen elektromagnetische Felder simultan in unterschiedliche Schwingungszustände. Damit demonstrieren sie nicht nur den fließenden Übergang vom Unvertrauten zum Alltäglichen, sondern auch eine praktische Grenze für hypothetische Quantencomputer, mit denen einige Forscher Probleme zu lösen hoffen, an denen klassische Computer scheitern müssen (Spektrum der Wissenschaft, Dezember 1995, Seite 62).

Das Rätsel des Übergangs von mikrophysikalischem zu klassischem Verhalten rührt von einer wesentlichen Eigenschaft aller Quantenpartikel her: Sie verhalten sich nicht nur wie Teilchen, sondern auch wie typische Wellen. (Umgekehrt kann Licht sich wegen seiner Quantennatur so verhalten, als bestünde es aus Teilchen – den Photonen.) Darum lassen sie sich, wie Schrödinger 1926 herausfand, mathematisch durch eine Wellenfunktion beschreiben; sie enthält alles, was man über die betreffenden Teilchen wissen kann, und gibt den Spielraum aller ihnen möglichen Aufenthaltsorte und Bewegungen an.

Das Meßproblem

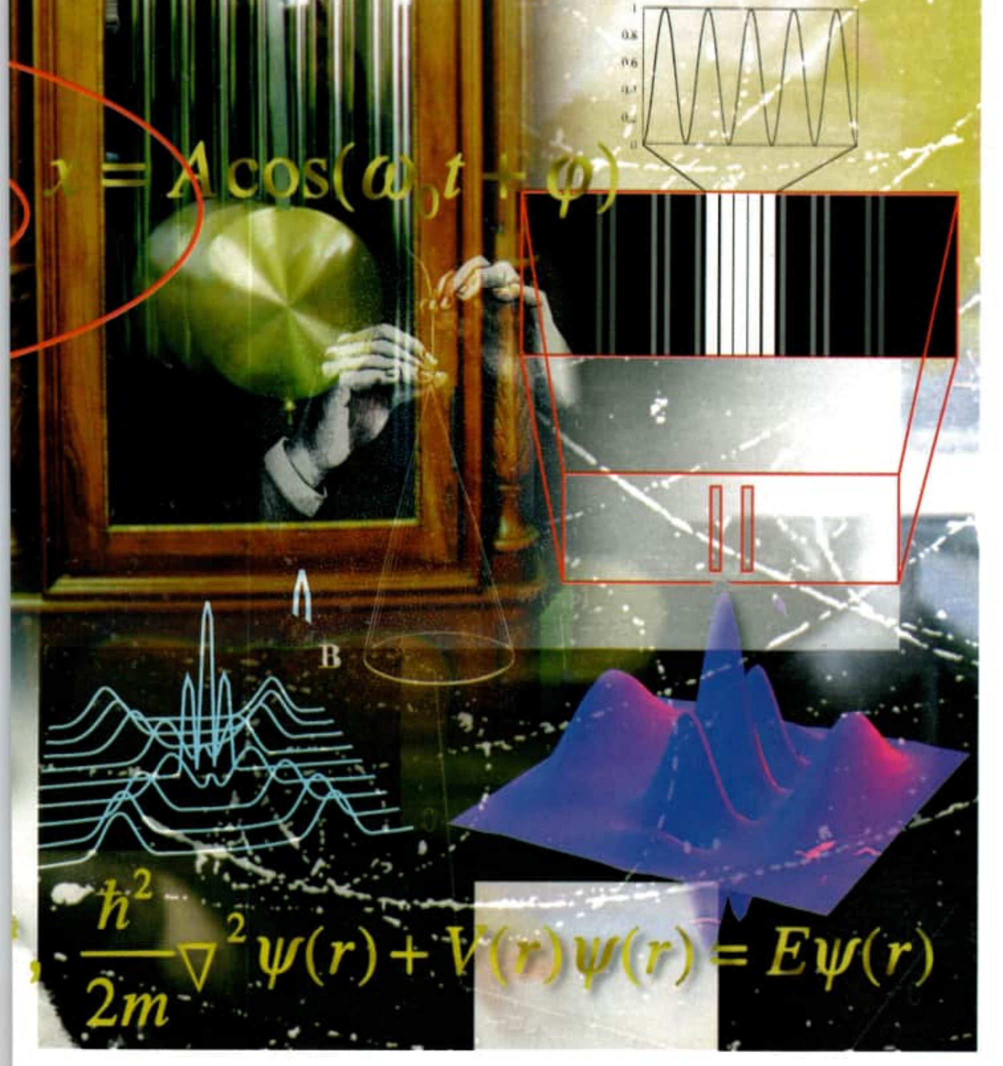
So gesehen besagt die Wellenfunktion, daß ein Teilchen in allen ihm möglichen Zuständen zugleich verharrt. Doch jede Messung realisiert stets nur einen einzigen davon. Die offene Frage, wie – oder gar warum – die Messung ein ganz bestimmtes Resultat herbeiführt, war der Anlaß für Schrödingers Gedankenexperiment: Das radioaktive Atom, das man gemeinsam mit der Katze und der Giftphiole in die Kiste gepackt hat, hat eine Zerfallswahrscheinlichkeit von 50 Prozent pro Stunde; der Zerfall löst einen Hammer aus, der das Fläschchen zertrümmert und das Gift freisetzt.

Gemäß der Quantenmechanik verharrt das radioaktive Atom, solange es unbeobachtet bleibt, in einem eigenartigen Zwitterzustand: Es ist zugleich zerfallen und nicht zerfallen. Eine solche Superposition (Überlagerung) ist für Quantenobjekte typisch. Ein Hüllenelektron eines Atoms vermag gleichzeitig mehrere Energieniveaus einzunehmen; wenn ein einzelnes Photon einen Doppelspalt passiert, scheint es durch beide Öffnungen zu treten. Teilchen in wohldefinierter Superposition heißen kohärent.

Doch was geschieht, wenn man Quantenteilchen mit einem makroskopischen Objekt koppelt – etwa einer Katze? Dehnt man die Regeln der Quantenmechanik auf das Tier aus, so müßte es ebenfalls in einer kohärenten Zustandsüberlagerung verweilen – es wäre gleichzeitig tot und lebendig. Das ist offensichtlich absurd: Aus Erfahrung wissen wir, daß Katzen entweder tot oder lebendig sind, weder beides zusammen noch keines von beiden. Rein technisch gesehen ist die Katze eigentlich ein Meßgerät, das wie ein Geigerzähler radioaktive Zerfälle feststellt. Demnach lautet die Frage, ob Meßinstrumente nicht in den gleichen unbestimmten Zustand übergehen müßten wie die Quantenpartikel, für deren Nachweis sie konstruiert sind.

Der dänische Physiker Niels Bohr (1885 bis 1962; Nobelpreis 1922), einer der Begründer der Quantentheorie und Adressat von Schrödingers bedauernder Bemerkung, gab zur Antwort, daß Messungen stets mit einem klassischen Apparat ausgeführt werden müssen. Gemäß der heute als Kopenhagener Deutung bekannten Standard-Interpretation postulierte Bohr, makroskopische Detektoren würden niemals in einen Zustand verschwommener Superpositionen geraten – ohne freilich genau zu erklären, warum. „Er legte recht willkürlich fest, was klassisch ist", meint Wojciech Zurek vom Los-Alamos-Nationallaboratorium in New Mexico, „Messungen ereigneten sich einfach."

Bohr erkannte auch, daß die Grenze zwischen klassischer und quantenphysikalischer Domäne sich je nach experimenteller Anordnung verschieben kann. Dabei ist nicht unbedingt die Größe entscheidend: Eine Superposition kann weit



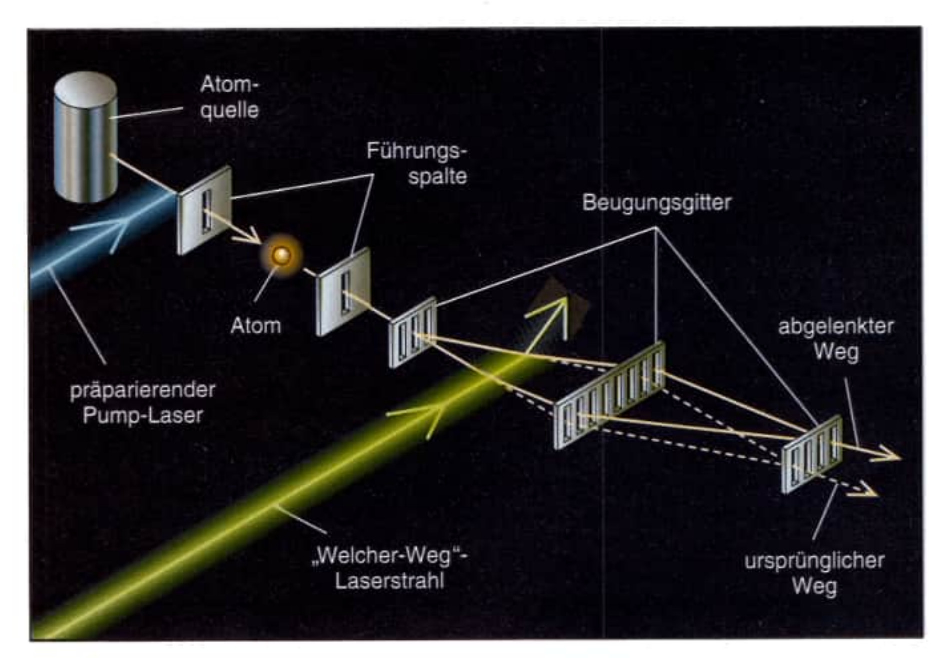


Bild 2: Ein aufgespaltener und wieder vereinigter Strahl von Natriumatomen erzeugt ein Interferenzmuster (nicht abgebildet). Ein Laserstrahl, der von dem einen Atom abgelenkt wird, liefert Welcher-Weg-Information und verhindert dadurch die Interferenz. Doch wenn bei bestimmten Laser-Wellenlängen keine Welcher-Weg-Information nach außen dringt, bilden sich die Interferenzstreifen erneut – ein Beispiel für die Verschränkung von Quantensystem und klassischem Beobachtungsapparat.

oberhalb atomarer Dimensionen bestehenbleiben.

Im November 1995 demonstrierten David Pritchard vom Massachusetts Institute of Technology in Cambridge und seine Mitarbeiter diese Tatsache, indem sie Natriumatome durch ein Interferometer sandten; in einem solchen Gerät kann jedes Teilchen zwei verschiedene Wege einschlagen, die sich anschließend wieder vereinigen. Aufgrund seiner Welleneigenschaften interferierte jedes Atom mit sich selbst und erzeugte auf einem Beobachtungsschirm ein Muster dunkler und heller Streifen – genau wie Laserlicht, das durch einen Doppelspalt tritt. Nach der Standard-Interpretation der Quantenmechanik nimmt das Atom beide Wege gleichzeitig, und somit ist seine gesamte Bewegung von der Strahlenquelle bis zum Schirm die Superposition eines einzelnen Teilchens, das zwei Bahnen beschreibt (Bild 2).

Die Forscher richteten nun einen Laserstrahl auf einen der Wege. Dadurch zerstörten sie die Interferenzstreifen, denn ein am Natriumatom gestreutes Laserphoton vermag anzuzeigen, welchen Weg das Atom genommen hat; die Quantenmechanik verbietet nämlich, daß Welcher-Weg-Information und Interferenz zugleich auftreten (Spektrum der Wissenschaft, Februar 1995, Seite 50).

Auf den ersten Blick scheint der Streuvorgang eine Messung zu sein, welche die Kohärenz zerstört. Doch Pritchard konnte das Interferenzmuster – und somit die Kohärenz – wiederherstellen, indem er die beiden Teilchenwege so veränderte, daß ihr Abstand exakt einem ganzzahligen Vielfachen einer viertel Wellenlänge des Laserphotons entsprach; unter dieser Bedingung ließ sich nicht feststellen, von welchem Weg aus das Photon gestreut worden war. „Die Kohärenz geht nicht wirklich verloren", erläutert Pritchard. „Das Atom wurde mit einem größeren System verschränkt." Das heißt, der quantenmechanische Zustand des Atoms wurde mit dem Meßgerät – in diesem Fall dem Photon – gekoppelt.

Pritchards Experiment, das auf einem gut dreißig Jahre alten Vorschlag des amerikanischen Physikers Richard Feynman (1918 bis 1988; Nobelpreis 1965) beruht, wirft allerdings – wie viele dieser Art – mehr Fragen zur Quantentheorie auf, als es zu lösen vermag. Es zeigt, daß die Definition des Meßgeräts mehrdeutig sein kann. Was wäre die Messung im Falle von Schrödingers Katze? Das Öffnen des Deckels? Oder der Augenblick, in dem das Licht die Netzhaut des Beobachters erreicht und von seinem Bewußtsein registriert wird? Oder ein elektrostatischer Funke im Katzenfell?

In jüngster Zeit haben mehrere Forscher-Teams diese Fragen im Laborversuch zu klären begonnen. Manche Physiker bezweifeln freilich, daß man es dabei mit ausgewachsenen Schrödinger-Katzen zu tun bekommt – oft spricht man verniedlichend von Quantenkätzchen. Jedenfalls hört der Übergang vom quantenphysikalischen zum klassischen Bereich – in der Fachsprache Kollaps der Wellenfunktion oder Reduktion des Zustandsvektors genannt – allmählich auf, Gegenstand reiner Gedankenexperimente zu sein.

Quantenkätzchen

Carlos Stroud und John Yeazell von der Universität Rochester (US-Bundesstaat New York) experimentierten 1991

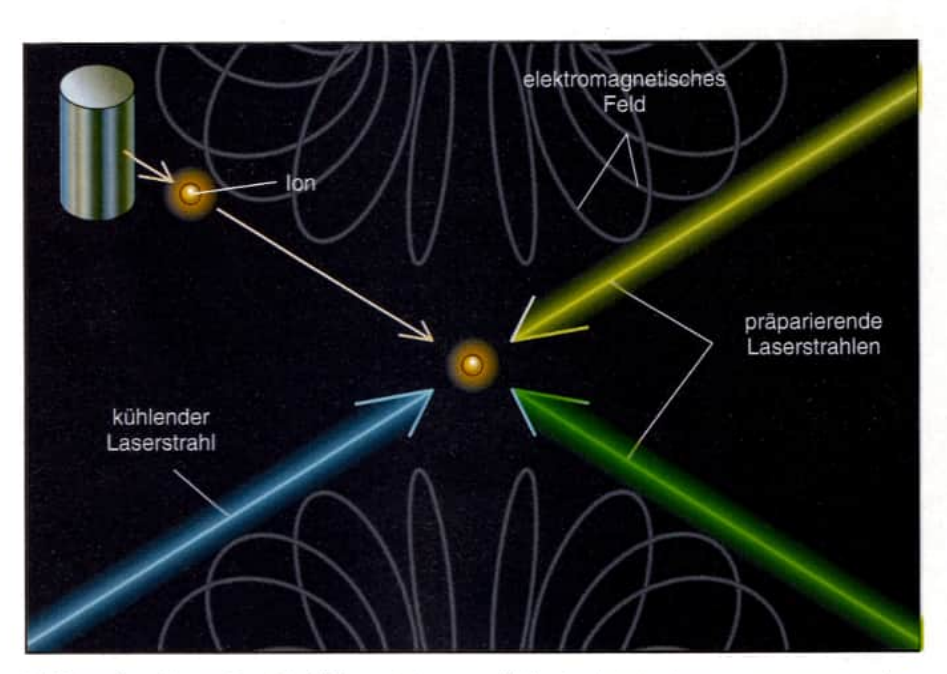


Bild 3: Eine Abart der Schrödinger-Katze läßt sich aus einem Beryllium-Ion herstellen, das man zunächst mit einer elektromagnetischen Falle fängt und mit einem Laser kühlt. Zusätzliche Laser erzeugen eine Superposition zweier Spin-Zustände. Werden diese in gegenläufige Schwingung versetzt, ist das Ion an zwei Orten gleichzeitig.

mit Rydberg-Atomen, benannt nach dem schwedischen Forscher Johannes Rydberg (1854 bis 1919), der bereits Ende des vorigen Jahrhunderts einen Zusammenhang zwischen Spektrallinien und Atomstruktur vermutete. Normalerweise halten sich die Elektronen in weniger als einem Nanometer (millionstel Millimeter) Abstand vom Atomkern auf; doch in Rydberg-Atomen entfernt sich das äußerste Hüllenelektron mehrere tausendmal weiter vom Kern. Diese Aufblähung läßt sich durch extrem kurze Laserpulse erreichen, die das Elektron praktisch in mehrere hochangeregte Zustände gleichzeitig versetzen. Die so erzeugte Superposition der Energieniveaus entspricht einem Wellenpaket, das den Kern in der vergleichsweise riesigen Entfernung von einem halben Mikrometer (tausendstel Millimeter) umkreist; das recht kompakte Paket gibt die Aufenthaltswahrscheinlichkeit des hochangeregten Elektrons an, das in diesem Spezialfall tatsächlich einem – allerdings verschmierten und zerlaufenden – Planeten auf seiner Bahn um die Sonne gleicht (Spektrum der Wissenschaft, August 1994, Seite 56).

Wie man in Rochester beim Aufblähen von Kaliumatomen feststellte, lief das Wellenpaket nach einigen Umläufen zwar auseinander, bildete dafür aber zwei kleinere, einander auf der Umlaufbahn gegenüberliegende Pakete. Stroud und sein Mitarbeiter Michael W. Noel wiesen nun im September 1996 nach, daß die beiden Pakete eine winzige Schrödinger-Katze darstellen – ein einziges Elektron an zwei Orten.

Allerdings ist ein Elektron praktisch nur ein ausdehnungsloser Punkt. Der makroskopischen Welt etwas näher steht ein Ion (ein geladenes Atom), das sich immerhin aus zahlreichen Elementarteilchen zusammensetzt. Im Mai 1996 schufen Chris Monroe und David J. Wineland am National Institute of Standards and Technology (NIST) in Boulder (Colorado) eine Schrödinger-Katze aus einem Beryllium-Ion (Spektrum der Wissenschaft, August 1996, Seite 24).

Zunächst fingen sie das Ion mit elektromagnetischen Feldern ein und beschossen es mit einem Laserstrahl, der seine Wärmebewegung fast völlig abbremste und es dadurch auf wenige Millikelvin (tausendstel Grad über dem absoluten Nullpunkt) abkühlte. Dann richteten die Wissenschaftler zwei Laser etwas unterschiedlicher Frequenz auf das Ion, um seinen Spin zu beeinflussen – eine innere quantenphysikalische Eigenschaft, die eine bestimmte Richtung auszeichnet, zum Beispiel entweder aufwärts oder abwärts. Mit den Lasern brachten die Forscher das Beryllium-Ion in eine Superposition von Spin-aufwärts- und Spin-abwärts-Zuständen (Bild 3).

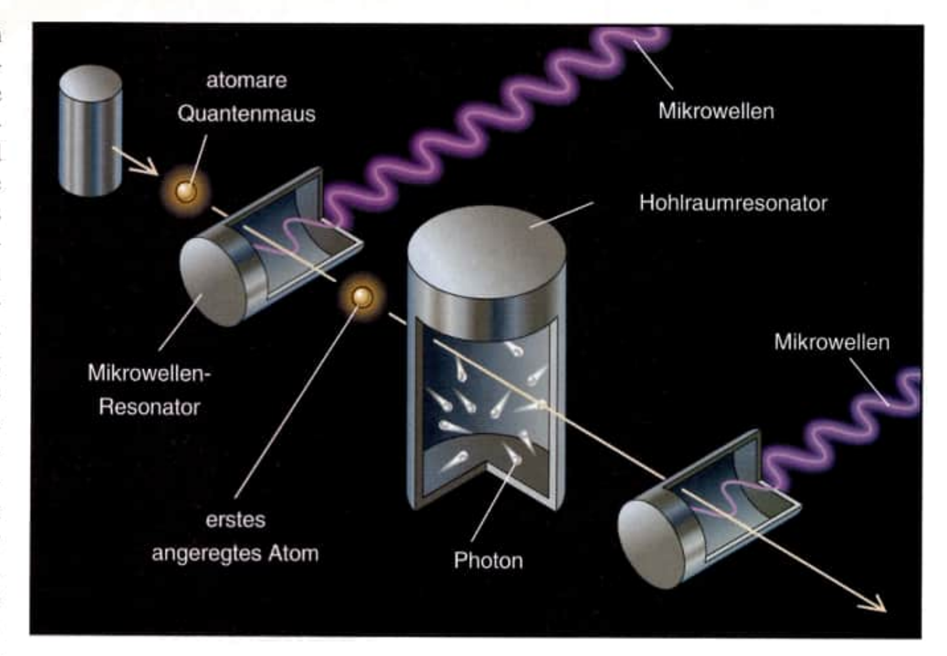


Bild 4: Mit dem elektromagnetischen Feld in einem Hohlraumresonator – das heißt mit darin eingesperrten Photonen – kann man eine Schrödinger-Katze auf ihre Lebendigkeit testen. Zunächst regen Mikrowellen ein Rubidium-Atom zur Superposition zweier Zustände an (links). Beim Durchgang durch den Hohlraum in der Mitte überträgt sich die Superposition auf das darin herrschende elektromagnetische Feld. Ein zweites Atom dient quasi als Quantenmaus, welche den Zustand des Feldes sondiert. (Der dritte Hohlraumresonator gleicht dem ersten und ermöglicht durch Quanteninterferenz die Messung des Zustands in dem mittleren Hohlraum.)

Erst nach diesen Vorbereitungen begann der eigentliche und halbwegs makroskopische Teil des Versuchs. Durch leichtes Variieren der Laser-Abstimmung gelang es den Forschern, den Spin-aufwärts-Zustand in eine räumliche Hin-und-Her-Schwingung zu versetzen, während der Spin-abwärts-Zustand dieselbe Oszillation synchron im Gegentakt ausführte – quasi eine Her-und-Hin-Schwingung. Eine Momentaufnahme dieser quantenmechanischen Doppelschaukel würde ein und dasselbe Ion an zwei physikalischen Orten zugleich zeigen: mit Aufwärts-Spin an der einen Stelle und Abwärts-Spin an der anderen. Die beiden Spinzustände entfernten sich im Laufe der Gegenschwingung immerhin bis auf 80 Nanometer voneinander – in atomarem Maßstab ein gehöriges Stück. „Wir brachten ein einzelnes Ion dazu, sich an zwei Orten aufzuhalten, die gegenüber seiner ursprünglichen Größe sehr weit voneinander entfernt waren", sagt Monroe.

Im Dezember 1996 gingen Michel Brune, Serge Haroche, Jean-Michel Raimond und ihre Gruppe an der École Normale Supérieure (ENS) in Paris noch einen Schritt weiter. „Wir konnten das Dahinschwinden von Quanteneigenschaften verfolgen", erklärt Haroche. Um den Kollaps der Superposition in den einen oder anderen Zustand zu beobachten, ließ die Forschergruppe gleichsam eine Quantenmaus vor ihrer Schrödinger-Katze baumeln; damit konnte man überprüfen, ob die Katze lebendig oder tot war (Spektrum der Wissenschaft, Februar 1997, Seite 24).

Als Katze diente ein eingesperrtes elektromagnetisches Feld – einige Mikrowellen-Photonen in einem Hohlraumresonator. In dieses Gefängnis steckte man zusätzlich ein Rydberg-Atom, das zuvor zu einer Superposition zweier unterschiedlicher Energiezustände angeregt worden war. Das Atom übertrug seinen überlagerten Zustand auf das im Hohlraum herrschende elektromagnetische Feld und versetzte es in eine Superposition von zwei Schwingungszuständen unterschiedlicher Phase. Insofern ähnelte das Feld einer Schrödinger-Katze zwischen Leben und Tod.

Ein weiteres in den Hohlraum gebrachtes Rydberg-Atom stellte nun die Quantenmaus dar, auf die das elektromagnetische Feld Information über seine Phasensuperposition transferierte. Der Vergleich beider Atome erlaubte Rückschlüsse auf den Überlagerungszustand des Feldes (Bild 4).

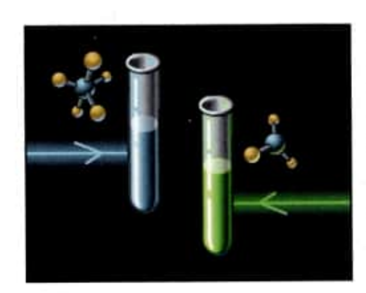
Vor allem vermochte man durch Kontrolle wichtiger Parameter festzustellen, wie kohärente Zustände in klassische übergehen. Indem die Forscher die Zeitspanne zwischen dem Einbringen der beiden Rydberg-Atome von 30 bis 250 Mikrosekunden (millionstel Sekunden)

variierten, konnten sie beobachten, wie der Kollaps der Superposition sich als Funktion der Zeit verhält; und durch Verstärken des elektromagnetischen Feldes (Erhöhen der Photonenanzahl im Hohlraumresonator) ließ sich verfolgen, wie er von der Größe der Katze abhängt. „Zum ersten Mal können wir die Entwicklung von quantenphysikalischem zu klassischem Verhalten detailliert beobachten", sagt Haroche.

„Ein atemberaubendes Experiment", meint Zurek begeistert. „Eine Schrödinger-Katze zu sehen ist schon verblüffend genug; aber erstmals beobachten zu können, wie sie gezwungen wird, zwischen lebendig und tot zu wählen, und wie das seltsame Quantenverhalten verschwindet – das ist der eigentliche Coup." Außerdem deckten sich die Resultate mit den Erwartungen der meisten Theoretiker. „Für mich bedeutet das", bemerkt Zurek, „daß unsere simplen Gleichungen anscheinend eine gute Näherung sind."

Aufgaben für Quantenkatzen

Man hat mehrere technische Anwendungen für verschränkte und überlagerte Quantenzustände vorgeschlagen und im Laborversuch demonstriert – zum Beispiel Quantencomputer. Einige andere sind:



Quanten-Chemie
Mit Lasern lassen sich Moleküle in eine Superposition von Reaktionswegen versetzen; anschließend kann man damit durch Abstimmen des Interferenzgrads den chemischen Prozeß steuern. Im Dezember 1996 gelang mit einem ähnlichen Verfahren eine Isotopentrennung. Zu den Nachteilen gehören geringe Ausbeute und Schwierigkeiten bei der Kontrolle der Laser-Phasen.

Quanten-Kryptographie
Sie hat viel bessere Aussichten auf Verwirklichung als die hypothetischen Quantencomputer. Legitimierte Kommunikationspartner erzeugen einen gemeinsamen Schlüssel, der auf polarisierten Photonen beruht. Unbefugtes Abhören fällt sofort auf, weil es den Zustand der Schlüssel-Photonen zerstört. Daß das Prinzip funktioniert, ist über eine Lichtleiterstrecke von mehreren Kilometern Länge demonstriert worden.



Verlust der Kohärenz

Zurek ist der führende Vertreter der sogenannten Dekohärenz-Theorie, der zufolge die quantenphysikalische Kohärenz durch Wechselwirkung mit der Umgebung zerstört wird. Er formulierte sie – ausgehend von Gedanken Bohrs und anderer Gründerväter der Quantenmechanik – in den achtziger Jahren und hat sie seither mit wechselnden Mitarbeitern weiterentwickelt.

Die Außenwelt umfaßt dabei im Prinzip alles, was mit dem Quantensystem in Wechselwirkung treten und somit seinen Zustand unbeabsichtigt messen könnte – etwa ein einzelnes Photon oder die Schwingung eines Luftmoleküls. Demnach ist die Umgebung nicht bloß mit störendem Rauschen gleichzusetzen: Sie wirkt als Apparat, der das System fortwährend überwacht.

Das französische Experiment verdeutlicht diesen Zusammenhang. „Das System wird dekohärent, weil Information nach außen sickert", erklärt Zurek. Einige Photonen können dem Hohlraum entkommen und dadurch dem Universum den Zustand der übrigen mitteilen: „Schrödingers Katze bekommt quasi Junge, die aus der Kiste kriechen."

Wenn man die Grenze zwischen quantenphysikalischem und klassischem Verhalten durch die Außenwelt bestimmen läßt, werden gewisse mystische Aspekte der Quantentheorie entbehrlich, auf denen manche Autoren beharrt haben – etwa eine Sonderrolle für den bewußten Beobachter oder neuartige physikalische Kräfte (Spektrum der Wissenschaft, September 1992, Seite 82). Auch erklärt sich, warum räumliche Ausdehnung allein nicht die Ursache für Dekohärenz ist: Große Systeme – zum Beispiel echte Katzen – würden schon deshalb nie eine Superposition bilden, weil die unzähligen Partikel, aus denen das Tier besteht, eine riesige Anzahl von Umgebungsparametern beeinflussen und dadurch Kohärenz von vornherein ausschließen. Bei einem Pendel mit einem Gewicht von einem Gramm schrumpfen die in der Wellenfunktion des Systems enthaltenen Interferenzterme innerhalb einer Nanosekunde (milliardstel Sekunde) um den Faktor $2{,}7^{1000}$ – das heißt, das fremdartige Quantenverhalten verschwindet praktisch augenblicklich. Die noch von Bohr stammende intuitive Deutung habe sich bewährt, schließt Zurek daraus; jetzt kenne man sogar einen physikalischen Mechanismus, der die alte Behauptung konkretisiere.

Doch manche halten Zureks Dekohärenzmodell trotzdem für mangelhaft. „Meiner Ansicht nach vermag Dekohärenz kein bestimmtes Resultat auszuwählen", meint Anthony J. Leggett von der Universität von Illinois in Urbana-Champaign: „In der Realität bekommt man eindeutige makroskopische Ergebnisse."

Zurek ist aber überzeugt, daß die Umgebung tatsächlich diktiert, welche quantenphysikalischen Möglichkeiten letztlich Wirklichkeit werden. Dieser Prozeß – er nennt ihn umgebungsinduzierte Superselektion oder kurz Einselektion (von englisch: *environment-induced superselection*) – verwirft die unrealistischen Quantenzustände und läßt nur solche übrig, welche die Prüfung durch die Umgebung bestehen und klassisch werden können. „Die Auswahl wird von der Außenwelt getroffen; darum kann man nicht vorhersagen, welche der zulässigen Möglichkeiten realisiert wird", behauptet Zurek.

Die Erklärung wirkt nicht ganz überzeugend. Zureks Ansatz sei zwar verführerisch, kommentiert Monroe vom NIST: „Man kann damit Berechnungen durchführen und genau nachvollziehen, wie die Interferenzstreifen ausbleichen, wenn die Superposition sich ausdehnt. Allerdings bleibt ein komischer Nachgeschmack. Zurek kehrt einiges unter den Teppich, nur läßt sich schwer sagen, unter welchen."

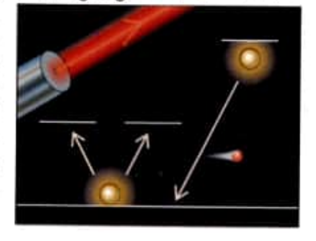
Das Problem ist, daß Dekohärenz – und in der Tat jede Vorstellung über den quantenphysikalisch-klassischen Übergang – notwendigerweise eine Ad-hoc-Theorie sein muß. Quantensuperpositionen müssen irgendwie Resultate haben, die unseren Alltagserfahrungen entsprechen. Daraus ergibt sich ein logischer Zirkel: Die makroskopischen Ereignisse gehen aus der Quantenwelt hervor, weil sie eben diejenigen sind, die wir erleben.

Einen gewissen Ausweg stellt die unplausible Vielwelten-Interpretation dar.



Quanten-Teleportation
Dabei geht es weniger um eine Science-fiction-Idee als um das Rekonstruieren zerstörter Information aufgrund des sogenannten Einstein-Podolsky-Rosen(EPR)-Effekts: Zwei gemeinsam erzeugte Photonen können im Prinzip über beliebige Entfernungen verschränkt bleiben, bis an einem eine Messung stattfindet (wodurch beide augenblicklich in einen definierten Zustand versetzt werden). Alice nimmt ein EPR-Photon mit, Bob das andere. Später mißt Alice den Zustand ihres Mitbringsels relativ zu einem dritten Vergleichsphoton. Bob kann nun diese Vergleichsmessung nutzen, um Alices drittes Photon (also nicht ihr EPR-Photon) neu zu schaffen. Unklar ist, ob Bob das Photon tatsächlich rematerialisiert oder nur eine perfekte Kopie geschaffen hat. Angeblich hat das Team um Anton Zeilinger von der Universität Innsbruck (Österreich) das Phänomen demonstriert; es könnte in der Quanten-Kryptographie Anwendung finden.

Quanten-Laseroptik
Normalerweise ist für Laser eine sogenannte Besetzungsinversion nötig: Es gibt mehr Atome im angeregten Zustand als im Grundzustand; beim Übergang in den Grundzustand senden sie ein Laserphoton aus. Diese Bedingung wurde 1995 erstmals umgangen: Zwei gekoppelte Laser bieten den im Grundzustand befindlichen Atomen zwei Möglichkeiten, zu ein und demselben höheren Energieniveau zu gelangen. Durch Interferenz zwischen beiden Wegen werden die Atome im Grundzustand unerreichbar; darum sind viel weniger angeregte Atome nötig. Solche Laser brauchen weniger Energie und könnten im Prinzip begehrte Röntgenstrahlung emittieren.



Sie wird von einigen prominenten Kosmologen verfochten und besagt, daß alle in der Wellenfunktion enthaltenen Möglichkeiten tatsächlich existieren, und zwar in einer unendlichen Verzweigung paralleler Universen (Spektrum der Wissenschaft, November 1994, Seite 50). Die Idee ist allerdings nicht überprüfbar, da die verschiedenen Welten einander unzugänglich bleiben.

Radikale Alternativen

Wegen der Probleme mit Dekohärenz und Vielwelten-Modellen neigt eine respektable Minderheit der sogenannten GRW-Theorie zu, benannt nach den Initialen der Forscher, die sie 1986 vorstellten: GianCarlo Ghirardi und Tullio Weber von der Universität Triest sowie Alberto Rimini von der Universität Pavia (Italien).

Nach ihrer Theorie läuft die Wellenfunktion eines Teilchens mit der Zeit auseinander, doch gibt es eine geringe Wahrscheinlichkeit, daß sie dabei auf ein geheimnisvolles Etwas im Hintergrund stößt und plötzlich lokalisiert wird. Für einzelne Partikel ist die Chance gering – nur einmal in zehn Millionen Jahren. Eine makroskopische Katze besteht aber aus rund 10^{27} Elementarteilchen, und daß zumindest eines einen Treffer landet, ist viel wahrscheinlicher: einmal pro 100 Pikosekunden (billionstel Sekunden). Somit hat die Katze praktisch überhaupt keine Chance, irgendeine Superposition zu bilden. Dekohärenz ist dafür unnötig: Der makroskopische Zustand der Katze ist die Folge spontaner mikroskopischer Kollapse.

Auch dieses Modell hat seine Mängel. Zum Beispiel ist der Zeitfaktor, der entscheidet, wann ein Treffer ausgelöst wird, völlig willkürlich; man wählt ihn einfach so, daß vernünftige Ergebnisse herauskommen. Und vor allem bleibt das Wesen des Auslösers unklar. „Im Grunde nimmt man eine Art universelles Hintergrundrauschen an, das sich selbst quantenmechanisch nicht beschreiben läßt", erklärt Leggett. Das Rauschen entsteht nicht einfach durch Zufallsprozesse in der Umgebung, sondern hat stark mathematischen Charakter. Der britische Mathematiker Roger Penrose von der Universität Oxford sucht in seinem Buch „Schatten des Geistes" (Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 1995) zu begründen, daß die lokale Gravitationswechselwirkung zwischen quantenmechanischen Alternativen ein plausibler Auslösemechanismus sei.

Es gibt noch radikalere Modelle; das bekannteste stammt von David Bohm (1917 bis 1992), der die Quantenmechanik für unvollständig hielt und durch sogenannte verborgene Variable zu ergänzen suchte. Nach Bohm entspricht der Wellenfunktion eine Art physikalisch-reale Kraft (das sogenannte Führungsfeld); auf diese Weise läßt sich eine deterministische Theorie ohne koexistierende Superpositionen formulieren (Spektrum der Wissenschaft, Juli 1994, Seite 70). Allerding ist Bohms Modell ebensowenig verifizierbar wie die Vielwelten-Theorie: Verborgene Variablen sind nun einmal definitionsgemäß unsichtbar.

Darum geben viele Physiker dem Dekohärenz-Modell den Vorzug, weil es – ohne das Meßproblem ein für allemal zu lösen – wenigstens keine unbeweisbaren Zusatzhypothesen enthält. Die Dekohärenz beantworte die physikalischen Aspekte der Frage, meint Zurek, lasse aber die metaphysischen offen – etwa die, wie das Bewußtsein des Beobachters ein Resultat wahrnehme: „Mir ist nicht klar, ob man auf alle Fragen eine Antwort erwarten darf, zumindest solange wir nicht mehr über die Beziehung zwischen Geist und Gehirn wissen."

Vielleicht lassen sich manche Theorien ausschließen, indem man immer größere Superpositionen erzeugt; zum Beispiel sagen Dekohärenz und GRW dafür unterschiedliche Obergrenzen voraus. „Wir würden gern zu komplexeren Systemen übergehen und immer mehr Teilchen verschränken", meint Haroche von der ENS – nicht nur zehn wie bisher. Monroe hofft, künftige Experimente am NIST würden förmlich als „Dekohärenz-Überwacher" dienen: „Wir können Rauschen simulieren und damit die Superposition gezielt zusammenbrechen lassen." Leggett hat den Gebrauch von SQUIDs (supraleitenden Quanteninterferenz-Detektoren) vorgeschlagen; in solchen ringförmigen Sensoren könnte man starke Ströme simultan in entgegengesetzter Richtung fließen lassen.

Doch das ist Zukunftsmusik. „Selbst in den spektakulärsten Experimenten hat man eine Überlagerung von vielleicht 5000 Partikeln nachgewiesen; damit ist man noch weit entfernt von der für die Makrowelt typischen Zahl 10^{23}", sagt Leggett, der dennoch Optimist bleibt: „Ich meine, man sollte einfach durch Experimente klären, ob die Quantenmechanik noch funktioniert."

Auch immer winzigere Transistoren – ihre Miniaturisierung unterschreitet schon den Mikrometerbereich – könnten bald in das klassisch-quantenphysikalische Grenzgebiet vordringen, wenn sie bei gut zehn Nanometern sogenannte mesoskopische Größenordnungen erreichen. Wie Da Hsuan Feng von der Drexel-Universität in Philadelphia (US-Bundesstaat Pennsylvania) vermutet, geht die Quantenmechanik vielleicht überhaupt nicht in die klassische Physik über; beide Beschreibungen könnten aus

noch unbekannten Theoriegebäuden hervorgehen, die einem eigenständigen physikalischen Zwischenreich entstammen.

Quantencomputer

Zwar vermögen die neuen Experimente das Meßproblem noch nicht vollständig zu klären, doch dafür sind sie sehr ergiebig für die Erforschung sogenannter Quantencomputer. Klassische Computer bestehen aus Transistoren, die nur die Wahl zwischen binären Zuständen (null oder eins) haben. Bei einem hypothetischen Quantencomputer verharrt hingegen jedes Bauelement in einer komplexen Superposition von null und eins (ein Quantenbit oder Qubit genannt). Die internen Berechnungen verlaufen als Wechselwirkung solcher Zustandsüberlagerungen – bis eine Messung erfolgt. Dadurch kollabieren die Superpositionen, und die Maschine liefert ein Endergebnis. Weil ein Quantencomputer zahlreiche mögliche Lösungen gleichzeitig erarbeitet, könnte er eine Aufgabe, für die klassische Rechner Jahre brauchen, theoretisch in Sekunden erledigen – etwa die Faktorzerlegung großer Zahlen, um Codes zu brechen.

Im Dezember 1995 haben Monroe und sein Team ein Zwei-Quantenbit-System konstruiert, indem sie aus einem Beryllium-Ion ein logisches Schaltelement – ein sogenanntes NICHT-Gatter – herstellten. Zu diesem Zweck wird ein Ion eingefangen und auf seinen niedrigsten Schwingungszustand abgekühlt; er bildet zusammen mit dem ersten Anregungszustand ein Bit. Der Spin eines Hüllenelektrons ist das zweite Bit. Durch Laserpulse sind beide Bits in Superposition zu bringen, und das zweite läßt sich in Abhängigkeit vom ersten umschalten. Bei anderen Gatter-Varianten sind zwei Photonen über ein Atom in einem Hohlraumresonator gekoppelt, oder ein verschränktes Photonenpaar durchläuft ein Netz von Detektoren.

Dennoch bleibt sehr ungewiß, ob sich ein brauchbarer Quantencomputer bauen läßt, der auf der Superposition Tausender Ionen beruht und simultan Milliarden von Rechenoperationen ausführt. Das Problem ist die Unbeständigkeit der Superpositionen: Die logischen Gatter müssen so schnell arbeiten, daß die Qubits ihre Kohärenz nicht unterwegs einbüßen. Im August 1996 haben Haroche und Raimond in „Physics Today" aus den Daten der NIST-Gatterexperimente berechnet, daß die Bits bei einer Arbeitsgeschwindigkeit der Gatter von 0,1 Millisekunden mindestens ein Jahr lang in ihren Superpositionen verharren müßten, um eine



Bild 5: Theoretisch könnte man auf einer Atomhülle Information speichern, zum Beispiel farbige Schriftzeichen. Das Außenelektron eines Rydberg-Atoms bildet eine Superposition von 2500 Energieniveaus; darum ist seine Wellenfunktion genügend komplex. Indem man ihrer Amplitude und Phase bestimmte Farben und Sättigungsgrade zuordnet, lassen sich Worte formen.

brauchbare Berechnung (in diesem Falle die Faktorisierung einer 200-stelligen Zahl) auszuführen.

Andere Physiker sind weniger pessimistisch und vertrauen auf – bei klassischen Computern längst unerläßliche – Codes zur Fehlerkorrektur. „Sie geben an, wie man den Schaden repariert", erklärt David DiVincenzo vom Thomas-J.-Watson-Forschungszentrum der Firma IBM in Yorktown Heights (US-Bundesstaat New York). Außerdem hofft er, ein neuer Typ von Quantencomputern, der auf der Kernspinresonanz (*nuclear magnetic resonance*, NMR) beruht, könnte die Kohärenzzeiten auf eine Sekunde und mehr erhöhen.

Angenommen, eine Flüssigkeit – eine Tasse Kaffee – wird einem magnetischen Feld ausgesetzt. Aufgrund von Wärmeschwingungen und anderen Störungen wird nur etwa jedes millionste Koffeinmolekül sein eigenes (durch die Kernspins erzeugtes) magnetisches Moment parallel zum äußeren Feld ausrichten. Diese Minderheit läßt sich nun durch Radiowellen in eine Superposition von Aufwärts- und Abwärts-Spinzuständen versetzen. Die Kohärenz ist in diesem Fall leichter aufrechtzuerhalten, weil das wilde Durcheinander der umgebenden Moleküle sich im Mittel völlig aufhebt und die überlagerten Kernspins gut abschirmt; das Koffein, das die Quantenberechnungen ausführt, sitzt gleichsam im Auge eines Wirbelsturms. Zwei Forschergruppen haben kürzlich mittels Kernspinresonanz einen simplen Quantencomputer erzeugt, der mit vier Qubits eins und eins addiert. Kompliziertere Systeme mit bis zu zehn Qubits sind demnächst zu erwarten.

Das größte Hindernis ist das Ablesen. Da die einzelnen Spins der Molekülbestandteile sich nicht separat messen lassen, muß man alle zusammen auswerten – ob sie nun Qubits repräsentieren oder nicht. Darum sind komplexe Moleküle mit vielen möglichen Spin-Orientierungen stärker verrauscht als einfache. „Man wird damit ein paar hübsche Kunststücke fertigbringen", meint Monroe, „aber oberhalb von zehn Bit beginnen die echten Probleme." Bei zehn Bit ist der Output tausendmal schwächer als bei einem Bit; bei 20 Bit sinkt seine Signalstärke auf ein Millionstel. Darum wird die NMR-Technik möglicherweise niemals bis in den rechnerisch brauchbaren Bereich von wenigstens 50 Bit vorstoßen.

Eine ganz andere Anwendung von Quantenüberlagerungen schlägt Stroud vor: Datenspeicherung auf einem einzelnen Atom. In einem Rydberg-Atom ließe sich ein Elektron in eine Superposition von 2500 unterschiedlichen Energieniveaus bringen; das sei eine sehr komplexe Wellenfunktion, die viel Information speichern könne. Theoretisch hat Stroud vorgeführt, daß sich auf diese Art zum Beispiel das Wort OPTICS auf ein Atom schreiben läßt (Bild 5).

Im Laborversuch sind weitere Anwendungen – für Kryptographie, Chemie und sogar Teleportation – demonstriert worden (siehe Kasten auf Seite 60/61). Schrödingers Katze mag zwar die klügsten philosophischen Köpfe genarrt haben, doch scheinen gute technische Gründe für ihre verquere Fortexistenz zu sprechen.

Philip M. Yam ist Redakteur von Scientific American.

Literaturhinweise

Auf der Suche nach Schrödingers Katze. Von John Gribbin. Piper, München 1993.

Wie viele Leben hat Schrödingers Katze? Herausgegeben von Jürgen Audretsch. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 1996.

Die Physik der Welterkenntnis. Von David Deutsch. Birkhäuser, Basel 1996.

Decoherence and the Transition from Quantum to Classical. Von Wojciech Zurek in: Physics Today, Band 44, Heft 10, Seiten 36 bis 44, Oktober 1991.

Where Does the Weirdness Go? Von David Lindley. Basic Books, 1996.

Schrödinger's Machines. Von Gerald J. Milburn. W. H. Freeman, 1997.



Das Internet ist essentieller Bestandteil der beginnenden Informationsgesellschaft. Prognosen zufolge werden zur Jahrtausendwende rund 400 Millionen Menschen Zugang zum Netz haben. Was sind die Konsequenzen?

Das **Dossier Internet** beleuchtet die Nutzung von Datennetzen und ihre künftigen Möglichkeiten aus verschiedenen Perspektiven. Wie kann die „Informationsmaschine" Internet besser als bisher für Forschung und Lehre erschlossen werden? Wie wird sich der kommerzielle Handel im Netz entwickeln? Welche Auswirkungen haben die neuen Möglichkeiten der Information und Kommunikation auf Arbeit und Leben, auf Demokratie und Politik?

Inhalt: Ein Round-Table-Gespräch mit dem EU-Kommissar Martin Bangemann, dem Vorsitzenden der Enquete-Kommision des Deutschen Bundestages „Deutschlands Weg in die Informationsgesellschaft" Siegmar Mosdorf und dem Generaldirektor des Europäischen Medieninstituts Professor Bernd-Peter Lange. Weitere Themen: Strategien der Informationssuche · Wissenschaftskommunikation · Sicherheit im Netz · Bildung im Internet · Telearbeit · Internet und Gesellschaft ·Telemedizin.

Spektrum-Dossier im Abonnement

Spektrum Dossiers verbinden bereits in Spektrum der Wissenschaft veröffentlichte Artikel mit neuen journalistisch erarbeiteten Beiträgen.

Sie können die Sonderheftreihe Spektrum der Wissenschaft Dossier auch im Abonnement beziehen. Sie erhalten vier Ausgaben, die jeweils am Quartalsanfang erscheinen, zum Jahresbezugspreis von DM 55,20 (anstatt DM 67,20 bei Einzelkauf) frei Haus; der Preis für Schüler oder Studenten auf Nachweis beträgt DM 48,–.

Sie gehen keine längerfristige Verbindung ein, denn Sie können Ihr Abonnement jederzeit kündigen. Ein kurzer Anruf bei unserem Leser-Service, Telefon 06221/504743, genügt.

Die Themen der nächsten Dossier-Ausgaben: „Lasertechnik" (April), „Ozeane" (Juli), „Robotik" (Oktober) und „Stress" (Januar 1999)

Eine Bestellkarte finden Sie auf den Seiten 19/20.



Psyche, Stress und Krankheitsabwehr

Gehirn und Immunsystem, die beiden übergeordneten Kontrollinstanzen des Organismus, arbeiten trotz aller Verschiedenheit ihrer Aufgaben eng zusammen. Sie tauschen sogar fortwährend biochemische Signale aus, häufig entlang den gleichen Bahnen. Dies erklärt manche psychischen Störungen bei körperlichen Erkrankungen und umgekehrt. Hier bieten sich neue Ansätze für wechselseitig wirksame Therapien.

Von Esther M. Sternberg und Philip W. Gold

Die Ära der Antibiotika hat eine schon in der Antike entwickelte Überzeugung fast vergessen lassen: daß häufig auch die psychische Verfassung bei körperlichen Krankheiten maßgeblich mitspielt. Die großen Erfolge mit natürlichen und synthetischen Substanzen in der Infektionsmedizin seit gut einem halben Jahrhundert erweckten die Vorstellung, bei der Bekämpfung fiebriger und entzündlicher Prozesse komme es vor allem darauf an, den Erreger zu vernichten, oder allgemeiner, das verursachende Pathogen zu eliminieren. Intensiv wurde und wird denn auch nach weiteren solchen Wirkstoffen gefahndet.

Noch Anfang dieses Jahrhunderts hatten Ärzte und Pflegekräfte dem seelischen Zustand ihrer Patienten große Bedeutung beigemessen. Nun wartet gerade die Infektions- und Entzündungsforschung, nachdem vor allem sie solche Assoziationen jahrzehntelang geradezu verpönte, mit deutlicheren Belegen für Wechselwirkungen zwischen Psyche und Immunsystem auf.

Daran ist auch unsere Gruppe beteiligt, die dabei mit Kollegen der Nationalen Gesundheitsinstitute der Vereinigten Staaten in Bethesda (Maryland) zusammenarbeitet. Dank neueren Möglichkeiten von Molekularmedizin und Pharmakologie vermochten wir dazu beizutragen, das komplizierte Kommunikationsnetz zwischen Immunsystem und Gehirn zu erkennen, über das die beiden Instanzen immerfort und bei jedem neuen Anlaß unverzüglich Signale austauschen: Von der körperlichen Abwehr erzeugte Moleküle machen dem Zentralnervensystem Meldung, und dieses wiederum kontrolliert mit eigenen Substanzen die Immunaktivität. Eben diese biochemischen Signale beeinflussen auch das Verhalten bei Stress und die Reaktion darauf.

Ist dieses Kommunikationsnetz gestört, gleich ob aufgrund eines angeborenen Defekts, durch ein Medikament, nach einer Vergiftung oder infolge eines chirurgischen Eingriffs, zeigen oder verstärken sich bestimmte Krankheitsbilder, die sonst von den beiden Instanzen gedämpft oder verhütet werden: Infekte, Entzündungen und Autoimmunleiden sowie damit einhergehende Veränderungen der Grundgestimmtheit.

Diese Befunde dürften große praktische Bedeutung gewinnen. Häufig schon wurde beobachtet, daß ein gegen eine Funktionsstörung des Nervensystems verabreichtes Medikament auch gegen eine Immunkrankheit wirkt und umgekehrt. Ein tieferes und detaillierteres Verständnis dessen, was dabei geschieht, verspricht eine Erweiterung bisheriger Therapiemöglichkeiten. Das neue disziplinenübergreifende Forschungsgebiet, etwas umständlich Psychoneuroimmunologie genannt, bestärkt endlich, was viele Menschen ohnehin intuitiv annehmen, manche Mediziner aber immer noch ignorieren oder gar negieren: daß das psychische Befinden sich bei Infektionen und Entzündungsprozessen auf die Widerstandskraft und die Heilung je nachdem günstig oder hinderlich auswirkt.

Zwei Aufpasser

Obwohl Gehirn und Immunsystem gänzlich verschieden aufgebaut sind und funktionieren, passen ihre Rollen beim Erhalt des Organismus doch in gewisser Weise verblüffend zusammen. Das Stress-System, dessen erste Kontrollinstanzen im Gehirn liegen, wird in bedrohlichen Situationen aktiviert; und auch das dezentral angelegte Immunsystem wendet sich automatisch gegen Bedrohliches, in seinem Falle etwa gegen Pathogene und körperfremde Moleküle (Bild 1). Hauptsächlich mit diesen beiden Reaktionssystemen sucht der Körper sein inneres Gleichgewicht zu erhalten oder wieder herzustellen. Der Einregelung dieser Homöostase (nach griechisch *homoios* für ähnlich, gleichartig und *stasis* für Zustand) dient ein erheblicher Teil der Zellmaschinerie.

Ist die Konstanz des inneren Milieus bedroht oder gestört, strebt der Organismus normale Verhältnisse an, indem er ein Repertoire von Reaktionen auf allen Ebenen in Gang setzt, von molekularen und zellulären Mechanismen bis hin zu Verhaltensweisen. Die Antwort kann sehr spezifisch sein, sich etwa gezielt gegen einen Erreger richten oder gegen einen angstauslösenden Umstand. Übersteigt die Störung allerdings ein gewisses Maß, gerät der Körper generell in Alarm. Er reagiert dann unspezifisch auf den Stressor, wie man jegliche Belastung durch starke Reize nennt, ob körperlicher oder seelischer Art. Das gilt gleichermaßen für

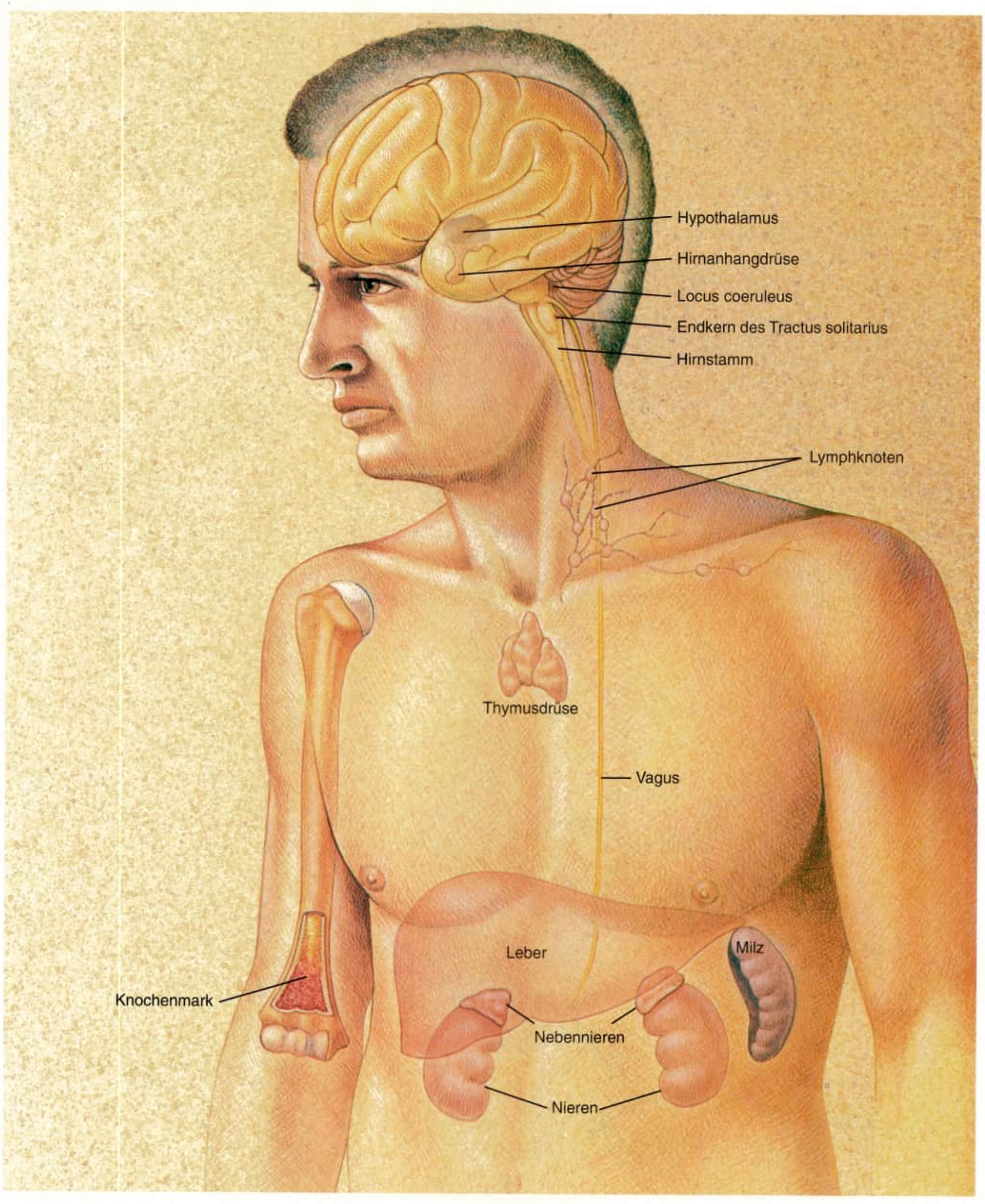


Bild 1: Durch ihre starke Spezialisierung ist vielen Ärzten das ganzheitliche Menschenbild verlorengegangen. Wohlbefinden und Gesundheit hängen aber vom austarierten Wechselspiel von Körper und Psyche ab. Insbesondere für die enge Verknüpfung von Stress- und Immunsystem finden sich nun immer mehr Belege. Beide tauschen vielfältige biochemische Signale aus und arbeiten dadurch gerade auch bei Krankheit zusammen. Auf jeden bedrohlichen oder belastenden Umstand reagiert der Körper mit einer Stress-Antwort, die vom Gehirn ausgeht. Wie dieses mit allen Organen und Geweben verbunden ist, erhält es wiederum von ihnen Informationen. Bei Stress sorgen vor allem Hypothalamus, Hirnanhangdrüse (Hypophyse) und blauer Kern (Locus coeruleus) sowie das sympathische Nervensystem und die Nebennieren dafür, daß der Organismus aktiviert wird, um dieser Situation begegnen zu können. Dabei gehen zugleich Mitteilungen an das Immunsystem, das anders als das Nervensystem ein Netzwerk ohne obere Instanz ist und vielfältig auf gefährliche Stoffe, eindringende Mikroorganismen und geschädigte oder entartete körpereigene Zellen reagieren kann. Immunzellen entwickeln sich in Knochenmark, Lymphknoten, Milz und Thymus. Sie kommunizieren untereinander mittels kleiner Proteine, die auch dem Gehirn Nachrichten überbringen können. Das geschieht über das Blut oder über Nervenbahnen wie den Vagus (der zum Eingeweidenervensystem gehört) und über den Endkern des Tractus solitarius.

Erregung bei Freude oder Ärger wie für Krankheit oder Leistungsdruck. Allerdings können die Gegenmaßnahmen ihrerseits belastend sein und sogar selbst eine Erkrankung bedingen.

Die vielerlei Verflechtungen zwischen Gehirn und Immunsystem, die dabei mitspielen, beginnt man gerade erst zu verstehen, und damit auch, auf welche Weise sie aufeinander regulierend und gegensteuernd einwirken. Unzweifelhaft aber ist, daß auf diesen Mechanismen Gesundheit beruht und Fehlfunktionen krankhafte Auswirkungen haben.

Stress an sich ist insofern normal und notwendig, als er hilft, bedrohliche und belastende Situationen mittels Veränderungen des physiologischen Zustands (insbesondere erhöhter Aktivität von Komponenten des vegetativen Nervensystems, vermehrter Ausschüttung von Hormonen wie Adrenalin und Steigerung des Blutdrucks) sowie des Verhaltens zu überstehen. Beispielsweise werden wir beim Erkennen einer Gefahr sogleich sehr wachsam, bekommen Angst und suchen uns mit allen Kräften zu wehren oder uns der bedrohlichen Situation zu entziehen; derweil ist an alles momentan Unwichtige und Hinderliche wie Essen, Schlaf oder Sex gar nicht zu denken – die Motivationen dafür werden zeitweilig gehemmt. Doch muß die Stress-Reaktion maßvoll geregelt sein. Ist sie suboptimal oder zu exzessiv, können die Regelmechanismen entgleisen.

Ebensowenig darf das Immunsystem zuviel oder zuwenig leisten. Zwar soll es Krankheitskeime aufspüren und vernichten sowie Gifte neutralisieren, abnorme Zellen beseitigen und helfen, schadhafte oder verbrauchte Gewebe auszubessern. Doch diese Mechanismen könnten zu heftig wirksam werden, so daß es ohne fortwährende Gegenkontrolle und Feinabstimmung nicht geht. Weder dürfen falsche Ziele angegriffen noch richtige verfehlt werden, denn das kann Autoimmun- und Entzündungskrankheiten bedingen. Bei zu geringer Effektivität hingegen sind Abwehrschwächen die Folge.

Gemeinhin vergleicht man das Gehirn oft mit einem Kommandozentrum, das über die Nervenbahnen – analog einem fest verdrahteten Netzwerk – elektrische Signale aussendet und empfängt. Die Immunabwehr hingegen ist ein dezentrales System, dessen Organe – Milz, Lymphknoten, Thymusdrüse und Knochenmark – über den Körper verteilt sind; nach vereinfachter landläufiger Auffassung kommuniziert es mit Hilfe von Immunzellen, die es in den Blutkreislauf freisetzt, so daß sie zu den jeweiligen Zielorten mitgenommen werden, wo sie ihre Botschaft überbringen oder andere Aufgaben erfüllen. Dieses Bild wird den Tatsachen nicht voll gerecht, denn was die Modi des Empfangs, des Erkennens und der Integration von Signalen aus der Umgebung betrifft, haben beide Systeme mehr Ähnlichkeiten als Unterschiede. Das gilt gleichermaßen für die Strukturen für diese Prozesse.

So gibt es in beiden Systemen sensorische Elemente, die Informationen von außen und aus dem Körper selbst aufnehmen, und motorische, welche passende Reaktionen ausführen. Kommunikation mit chemischen Überträgern ist ebenfalls beiden eigen und zudem eine wichtige Möglichkeit des gegenseitigen Kontakts: Die elektrischen Signale, die über die Nervenbahnen laufen, werden an den Synapsen – den Kontaktstellen zwischen Neuronen – in chemische umgewandelt, die in dieser Weise an andere Neuronen etwa Erregungen oder Hemmungen übermitteln; aber von Nervenzellen freigesetzte Substanzen können auch als Botenstoffe auf Immunzellen einwirken, und diese tauschen wiederum nicht nur untereinander chemische Botschaften aus, sondern senden ebenso welche dem Gehirn und den Nerven.

Eine wichtige Vermittlerrolle haben Hormone. An verschiedenen Stellen im Körper gebildete solche Regulatorstoffe transportiert das Blut zum Gehirn, das daraus Informationen bezieht. Doch das Gehirn selbst ist das Organ mit der wohl umfangreichsten Produktion von Hormonen, die teils sowohl in ihm wirken als auch anderwärts im Organismus.

Eine Schlüsselsubstanz ist das Corticotropin-Releasing-Hormon (CRH; Corticotropin freisetzendes Hormon). Es wird im Hypothalamus und in einigen anderen Hirnregionen produziert und sorgt dafür, daß Stress- und Immunreaktionen gleichsinnig verlaufen. Über eine besondere Blutbahn gelangt es in die kleine Hirnanhangdrüse, die Hypophyse (Bild 1). Damit beginnt eine regelrechte Hormonkaskade: Die Hypophyse gibt nun Corticotropin (auch adrenocorticotropes Hormon oder kurz ACTH genannt) ins Blut ab; dieses wiederum stimuliert die Nebennierenrinden, Cortisol (Hydrocortison) ins Blut auszuschütten, das am besten untersuchte und wichtigste Stress-Hormon (Bild 2).

Bild 2: Ein Hauptreaktionsweg bei einer Stress-Antwort geht vom Hypothalamus über die Hypophyse zur Nebennierenrinde. (Aktivierende Effekte sind rot, hemmende blau gezeichnet.) Der stimulierte Hypothalamus schüttet das Corticotropin-Releasing-Hormon (CRH) in ein Pfortadersystem aus, das zum Vorderlappen der Hypophyse zieht. Diese setzt daraufhin Corticotropin (auch adrenocorticotropes Hormon oder kurz ACTH genannt) ins Blut frei. Für die Nebennieren ist dies ein Signal, das klassische Stress-Hormon Cortisol abzugeben, das den Körper in eine der Herausforderung angemessene Erregung versetzt. Eine Überreaktion allerdings verhindert das Cortisol selbst: Es wirkt zurück auf den Hypothalamus und drosselt somit gleichsam die Quelle der Hormonkaskade. Cortisol ist zugleich ein starker Immunregulator. Es beeinflußt viele Komponenten des Immunsystems derart, daß nicht auch gesunde Zellen und Gewebe durch Über- oder Fehlreaktionen geschädigt werden.

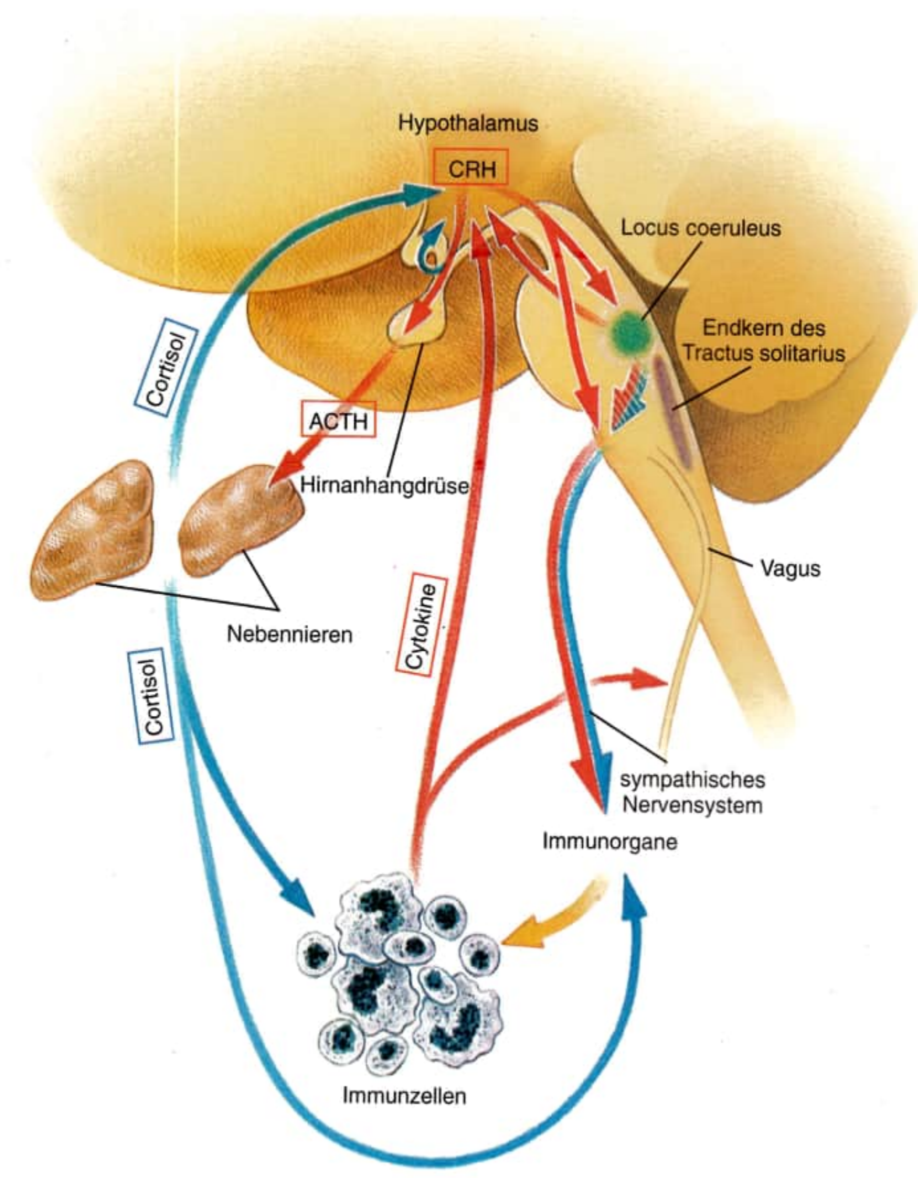


Bild 3: Das Stress-System und das Immunsystem können sich in ihrer Aktivität gegenseitig sowohl anregen (rote Pfeile) als auch hemmen (blaue Pfeile). So stimulieren von Immunzellen produzierte Cytokine über den Blutstrom oder über Nervenbahnen den Hypothalamus. Andererseits werden Immunzellen durch Cortisol gehemmt, dessen Freigabe ein vom Hypothalamus ausgehender hormoneller Signalweg veranlaßt. Dasselbe Hypothalamus-Hormon regt im Hirnstamm das sympathische Nervensystem an, das zu einem weiteren Stress-Reaktionsweg gehört, Organe des Immunsystems innerviert und auf diese Weise Entzündungsprozesse im Körper regulieren kann. Jede Störung dieser Kommunikation erhöht die Anfälligkeit für Krankheiten und birgt darum die Gefahr immunologischer Komplikationen.

Cortisol gehört zu den Steroidhormonen (so genannt wegen des chemischen Steroid-Grundgerüsts). Es bewirkt, daß das Herz schneller und kräftiger schlägt, sensibilisiert die Blutgefäße für das Hormon Noradrenalin, das auch als Überträgersubstanz des Nervensystems fungiert und ähnlich wie Adrenalin aktivierend wirkt, und beeinflußt zudem viele Stoffwechselfunktionen. Dies alles macht den Körper für eine Stress-Situation bereit. Überdies hemmt Cortisol – in einer einfachen Rückkopplungsschleife – die Freisetzung von weiterem CRH aus dem Hypothalamus, so daß dieser Teil der Stress-Antwort unter Kontrolle bleibt (Bild 2). Doch Cortisol ist außerdem ein hochwirksamer Immunregulator und Entzündungshemmer, wodurch es Überreaktionen bei Gewebeschäden verhindert. Somit hilft es im Verein mit CRH, die vom Gehirn regulierten Stress- und die dezentral gesteuerten Immunreaktionen aufeinander abzustimmen.

Die CRH sekretierenden Neuronen des Hypothalamus stehen des weiteren über Regionen im Hirnstamm, zu denen von ihnen Fasern verlaufen, in Verbindung mit dem sympathischen Nervensystem, das bei Gefahr für eine allgemeine Mobilisierung sorgt und auch durch diese Gebiete reguliert wird. Indem das sympathische Nervensystem Immunorgane wie Thymus, Lymphknoten und Milz innerviert, hilft es, Entzündungsreaktionen im Körper zu dämpfen. Außerdem haben die CRH sekretierenden Neuronen Ausläufer zu einem weiteren Gebiet im Hirnstamm, dem blauen Kern oder Locus coeruleus (Bilder 3 und 4); dessen Anregung bewirkt Unruhe, Angst und Wachsamkeit.

Allerdings ist für das Auslösen von angstbetontem Verhalten der Mandelkern (die Amygdala) vielleicht noch wichtiger (Bild 2; siehe auch „Das Gedächtnis für Angst" von Joseph E. LeDoux, Spektrum der Wissenschaft, August 1994, Seite 76). Dieser Teil des stammesgeschichtlich alten limbischen Systems, das unter anderem die affektive Tönung des Gesamtverhaltens und emotionelle Reaktionen wie Wut, Furcht und Zuneigung beeinflußt, erhält aus den sensorischen Regionen des Gehirns Impulse und entscheidet, ob Ereignisse stressen oder nicht. In seinem zentralen Kern gibt es auch CRH ausscheidende Neuronen, deren Fasern zum Hypothalamus, zum Locus coeruleus sowie in andere Teile des Hirnstamms führen.

Eben diese Neuronen sind Ziele der Botenstoffe von Immunzellen, die bei einer Abwehraktion freigesetzt werden. Einerseits wird somit über den Cortisol-Weg die Immunantwort in Grenzen gehalten, andererseits ein Verhalten ausgelöst, das Erholung und Heilung unterstützt – denn die CRH bildenden Mandelkern-Neuronen haben auch Verbindungen zu Regionen des Hypothalamus, die Nahrungsaufnahme und Fortpflanzungsverhalten regulieren.

Das sind aber noch längst nicht alle Kontaktwege zwischen Gehirn und Immunsystem. Auf deren Interaktionen haben beispielsweise auch Schilddrüsen-, Wachstums- und weibliche Geschlechtshormone Einfluß sowie die Bahnen des Sympathikus-Nebennierenmark-Systems, die man oft die andere Stress-Achse nennt.

Immunsignale an das Gehirn

Wir lernen immer mehr über die verblüffend elegante Art, in der das Immunsystem seine Attacken mit sehr fein abgestimmten Kaskaden zellulärer Ereignisse durchführt. Eine der wichtigsten neueren Erkenntnisse ist, daß weiße Blutkörperchen kleine molekulare Proteine (genauer: Polypeptide) produzieren, die indirekt Reaktionen anderer Teile des Immunsystems auf Krankheitserreger koordinieren. Eines davon ist Interleukin-1 (IL-1). Es wird von Monocyten – einer Sorte von

Freßzellen – gebildet und regt bestimmte andere Immunzellen, die Lymphocyten, zur Herstellung von Interleukin-2 (IL-2) an (siehe auch „Interleukin 2: ein Hormon im Immunsystem" vom Kendall A. Smith, Spektrum der Wissenschaft, Mai 1990, Seite 72). Dieser Stoff wiederum stimuliert die Reifung von Lymphocyten, aus denen unter anderem Plasmazellen werden, die Antikörper herstellen, oder cytotoxische *T*-Zellen (Antikörper erkennen Fremdantigene; cytotoxische *T*-Zellen töten virus-infizierte Zellen). Es gibt eine größere Anzahl von Interleukinen; auch an allergischen Reaktionen sind welche beteiligt.

Ihr Name spielt auf ihre zunächst vermutete Hauptfunktion an, zwischen weißen Blutkörperchen Signale auszutauschen (lateinisch *inter*, zwischen, und griechisch *leukos*, weiß). Als sich aber später herausstellte, daß viele andere Zelltypen und Organe – so auch manche Gehirnregionen – auf diese Moleküle ansprechen, fand man die treffendere, allgemeinere Bezeichnung Cytokine (von griechisch *kytos*, Höhlung oder Gefäß für Zelle, und *kinein*, bewegen).

Es handelt sich, so weiß man jetzt, um eine große Substanzklasse zur Verständigung zwischen Zellen. Jedes Cytokin wird von einem eigenen Gen codiert; und jedes hat einen besonderen Zelltyp als Ziel. Ob es stimulierend oder hemmend wirkt, hängt zum einen davon ab, welche anderen Cytokine oder sonstigen Stimuli gerade vorhanden sind, zum anderen von der augenblicklichen Stoffwechsellage. Infolgedessen vermag das Immunsystem sehr flexibel und paßgenau zu reagieren, um lokal ein Zellmilieu zu stabilisieren und im Organismus die Homöostase aufrechtzuerhalten.

Wie nun gelangen Cytokine ins Gehirn? Bis auf wenige Ausnahmen unterbindet die Blut-Hirn-Schranke den Übertritt von Stoffen zu den empfindlichen Nervennetzen (Spektrum der Wissenschaft, November 1986, Seite 82, und Mai 1991, Seite 102). Aber Krankheit und Entzündung sind Sondersituationen, in denen die Barriere durchlässiger wird; und manche Cytokine können sie ohnehin jederzeit leicht passieren (Bild 5).

Es gibt sogar indirekte Effekte: Einige Cytokine aus den Zellen der Innenwand von Hirngefäßen veranlassen, daß im umgebenden Hirngewebe andere Signalmoleküle freigesetzt werden; dazu können diese Zellen vermutlich wiederum durch Cytokine aus dem Blut stimuliert werden.

Cytokine können sich aber auch bestimmter Nervenbahnen bedienen, so des Vagus, der aus dem verlängerten Mark austritt und zahlreiche Muskeln, Drüsen und Organe in Brust- und Bauchraum innerviert (Bild 1). Wenn man in die Bauchhöhle Interleukin-1 infundiert, wird der Kern eines Tractus solitarius genannten Faserzuges aktiviert und damit die Haupteingangsstelle im Hirnstamm für sensorische Informationen aus den Eingeweiden, die zum Vagus enge Verbindung hat (Bild 3); bei durchtrenntem Vagus geschieht dies nicht.

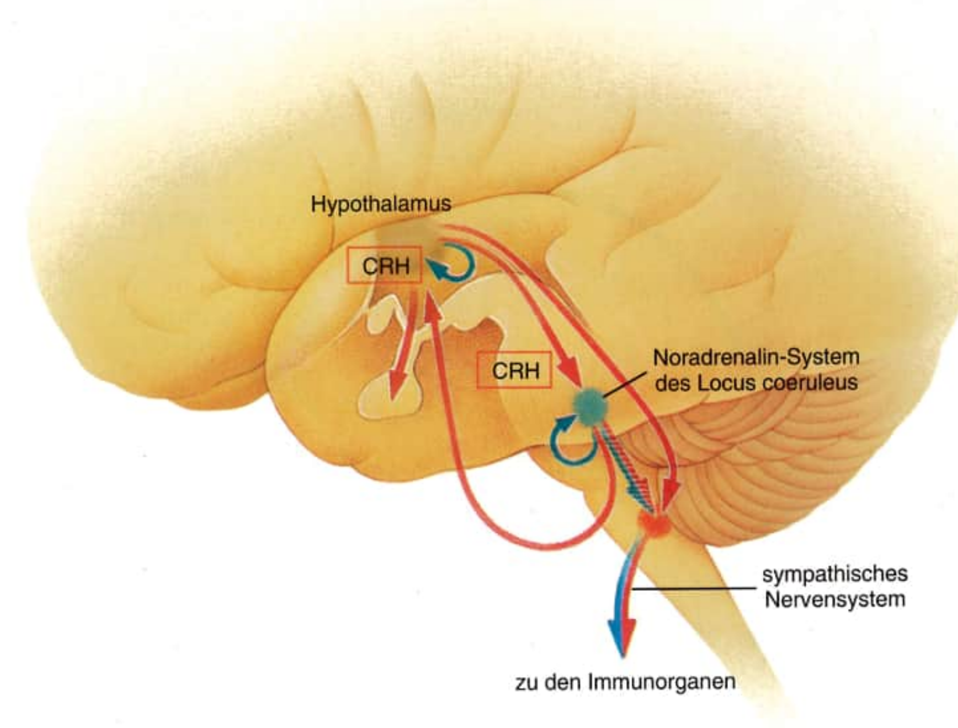


Bild 4: Das Hypothalamus-Hormon CRH beeinflußt auch über das sympathische Nervensystem die Stress-Anpassung. (Wiederum zeigen blaue Pfeile Hemmung, rote Aktivierung an.) Von den CRH sekretierenden Neuronen ziehen Bahnen ins Stammhirn zum Locus coeruleus. Andere Hypothalamus-Neuronen beeinflussen über Gebiete im Hirnstamm den Sympathikus, der den Stoffwechsel und die Herz- und Kreislauftätigkeit reguliert sowie Entzündungsreaktionen beeinflußt. Bei einer Stimulation des Locus coeruleus durch CRH treten erhöhte Wachsamkeit und Furcht auf, also schützende Verhaltensweisen. Dieses Kerngebiet wirkt zudem einerseits zurück auf den Hypothalamus, den es zur anhaltenden Produktion von CRH veranlaßt; andererseits besteht auch Kontakt zum sympathischen Nervensystem (insbesondere zum Vagus). An überschießenden Reaktionen jedoch hindern Hypothalamus und Locus coeruleus sich selbst durch eigene hemmende Rückkoppelung.

Der Weg über Nervenbahnen ist naturgemäß der schnellste. Bis das Signal im Gehirn eintrifft, vergehen nur Millisekunden. Auf diese Weise provozieren Cytokine Stress-Reaktionen wie ängstliche Zurückhaltung und ein Bedürfnis nach Schonung und Ruhe, falls in einer Körperregion Bedarf dafür besteht. Das ist nun eben der Zustand, daß man sich krank fühlt und am liebsten nur schläft oder döst. Der Organismus kann dann seine Energien für die Gesundung einsetzen.

Auch im Gehirn selbst – nicht nur in den Wandungen seiner Blutgefäße – werden Cytokine hergestellt, und zwar sowohl von den Neuronen wie von Zellen des Versorgungs- und Stützgewebes. In dem Falle regulieren diese Moleküle Wachstum und Absterben von Neuronen, doch kann das Immunsystem sie ebenfalls benutzen, um die Freisetzung von CRH zu bewirken.

Am besten erforscht ist dabei das System von Interleukin-1, dessen sämtliche Komponenten im Gehirn man seit kurzem im Detail kennt, auch die Rezeptoren dafür und einen Antagonisten, der diese Rezeptoren besetzt, aber nicht aktiviert. Dank dessen lassen sich nun Medikamente entwickeln, die zugehörige Aktionskreise gezielt anregen oder dämpfen und somit die Funktionen, die von ihnen reguliert werden.

Zuviel Cytokine im Gehirn aber können Nervenzellen schaden. So sind an transgenen Mäusen, bei denen eingeschleuste Fremdgene solche Stoffe im Übermaß exprimieren, neurotoxische Effekte festzustellen. Auch manche der neuronalen Symptome bei AIDS könnten durch eine überschießende Bildung bestimmter Cytokine verursacht sein; in Hirngewebe von Patienten fanden sich dort, wo Makrophagen – vielfältig aktive Zellen des Immunsystems – eingedrungen waren, hohe Spiegel unter anderem von Interleukin-1.

Entzündliche Erkrankungen

Jede künstliche Unterbrechung der Abstimmung zwischen Gehirn und Immunsystem bedingt erhöhte Anfälligkeit für entzündliche Prozesse, bei denen dann relativ häufig immunologische Komplikationen eintreten. Entsprechende Tierversuche verliefen sogar ziemlich oft tödlich. Das gilt auch für Infekte.

Gleicherweise zu wenig widerstandsfähig sind Tiere – wie offenbar auch Menschen – mit einer erblich veranlagten Störung der Stress-Reaktion, und zwar sowohl Ratten und Mäuse als auch Hühner. Ratten vom Lewis-Stamm etwa leiden an einem schweren Defekt der Stress-Achse vom Hypothalamus über die Hypophyse zur Nebenniere, so daß unter Belastung bei weitem zu wenig CRH ausgeschüttet wird. Hingegen ist der Fischer-Stamm, bei dem diese hormonelle Reaktion übersteigert ausfällt, offenbar so gut gewappnet, daß die Tiere kaum Entzündungen bekommen.

Einen ursächlichen Zusammenhang belegen verschiedene experimentelle pharmakologische und chirurgische Eingriffe. Beispielsweise verstärkt bei Ratten eine medikamentöse Blockade von Cortisolrezeptoren entzündliche Autoimmunprozesse, wie umgekehrt die Empfindlichkeit entzündungsanfälliger Artgenossen sinkt, wenn man ihnen kleine Mengen Cortisol spritzt. Selbst Tiere robuster Stämme werden äußerst empfindlich, sofern man ihnen Hypophyse oder Nebennieren entfernt; und solche Tiere des anfälligen Stamms kann man widerstandsfähig machen, indem man ihnen Hypothalamus-Gewebe robuster Artgenossen überpflanzt. Da demnach die Neigung zu entzündlichen Prozessen eng mit der Stress-Reaktion zusammenhängt, ist auch anzunehmen, daß jede Beeinträchtigung der biochemischen Kommunikation zwischen Gehirn und Immunsystem sich darauf auswirkt, wie die Erkrankung im Einzelfall verläuft.

Depression als Stress-Fehlfunktion

Die Verhältnisse beim Menschen sind viel schwieriger aufzuklären. Doch mehren sich Hinweise, daß auch bei uns verschiedene entzündliche Erkrankungen unter anderem darauf beruhen, daß die beschriebene hormonelle Stress-Achse zu schwach arbeitet und aus diesem Grunde die Immunabwehr zu stark.

Eine zu schwache Stress-Reaktion haben aber ebenso manche depressiven Patienten; sie fühlen sich denn auch meist müde und abgeschlagen, schlafen am liebsten immerzu, aber essen so gern, daß sie vielfach übergewichtig werden – völlig andere Symptome als bei einer klassischen Depression, wie wir noch sehen werden.

Die atypische Form gleicht eher bestimmten anderen Krankheitsbildern, die mit Ermattung einhergehen, und manifestiert sich vielleicht in einem ähnlichen Hormon- und Immunzustand:

– Beim chronischen Müdigkeitssyndrom sind die Patienten in der Regel über Monate ohne ersichtlichen Grund erschöpft und lustlos; für eine übermäßige Aktivität des Immunsystems spricht, daß sie erhöhte Temperatur, Gelenk- und Muskelschmerzen sowie allergische Symptome haben und daß die Titer von Antikörpern gegen eine Vielzahl von viralen Antigenen einschließlich des Epstein-Barr-Virus erhöht sind.

– Von Fibromyalgie Betroffene leiden ebenfalls an Muskel- und Gelenkschmerzen sowie an starkem Schlafbedürfnis, was beides auch im Anfangsstadium einer rheumatoiden Arthritis ähnlich ist.

– Die lichtabhängige Winterdepression (vergleiche „Kohlenhydrate und Depression", Spektrum der Wissenschaft, März 1989, Seite 86) hat Lethargie und dauernde Müdigkeit damit gemein; für sie sind zudem wie für die atypische Depression Eßlust und Gewichtszunahme charakteristisch. Etwas scheint mit der genannten Stress-Achse nicht zu stimmen, denn nach einer CRH-Injektion schüttet die Hirnanhangdrüse der Patienten nur verzögert relativ wenig ACTH aus; das erinnert an Folgen von Verletzungen oder Tumoren dieses Organs.

Generell dürfte es so sein, daß die von überaktiven Immunfunktionen begleitete

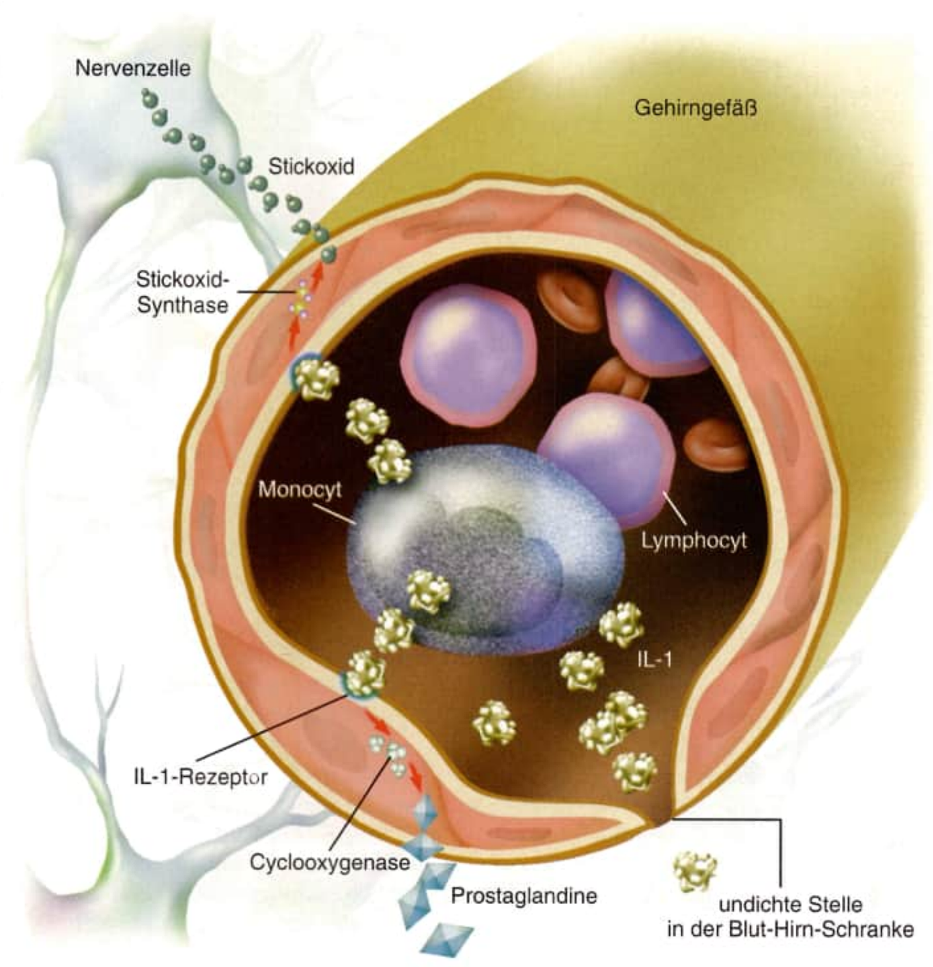


Bild 5: Chemische Signale des Immunsystems an das Gehirn, die mit dem Blut dorthin verfrachtet werden, können indirekt, aber auch direkt auf Nervenzellen wirken. Ein solcher Signalstoff ist Interleukin-1 (IL-1), den beispielsweise Monocyten, eine Sorte weißer Blutkörperchen, produzieren und der die Blut-Hirn-Schranke gewöhnlich nicht überwindet. IL-1 kann sich aber an Rezeptoren von Zellen binden, welche die Gehirngefäße auskleiden. Dies veranlaßt dann Enzyme solcher Endothelzellen, Stickoxid oder Prostaglandine (sowie vermutlich auch ihrerseits Cytokine) zu bilden, die ins Hirngewebe diffundieren und direkt Einfluß auf Nervenzellen nehmen. Von Blutzellen gebildetes Interleukin dringt jedoch auch selbst ins Gehirn ein, und zwar durch undichte Stellen in bestimmten Gefäßen. Es aktiviert dann direkt die Stress-Hormonkaskade wie auch andere neurale Systeme.

Abgeschlagenheit in den genannten Fällen mit einem Mangel an Cortisol einhergeht, wie es bei einem CRH-Defizit der Fall ist. Endgültige Beweise für den Zusammenhang stehen zwar noch aus; doch falls der Verdacht sich erhärtet, könnte man solchen Patienten vielleicht medikamentös helfen, indem man gezielt bei solchen Hormonen ansetzt.

Wie schon angedeutet, äußert sich die klassische Depression völlig anders. Die Patienten sind nicht eigentlich lethargisch, antriebslos, geistig träge und gefühlsarm, sondern leben gewissermaßen in einem strukturierten Angstzustand, der hauptsächlich das eigene Selbstwertgefühl schmälert. Sie empfinden sich als leer und unzulänglich, sehen die Zukunft oft ausgesprochen düster und sind deswegen auch ohne jede Hoffnung etwa für die Lösung von Problemen in ihrer Ehe oder im Beruf. Die Schuld daran geben sie sich wiederum selbst. In ihrem angstgetönt übererregten, melancholischen Zustand sind sie besonders verletzlich und halten schon harmlose Vorkommnisse für Anzeichen, daß jemand sie verlassen möchte oder gegen sie eingenommen ist.

Den sonstigen Anzeichen nach sind diese Patienten auch physiologisch übermäßig erregt. Typischerweise haben sie Schlafprobleme: Gewöhnlich sind sie bereits in aller Frühe hellwach. Sie haben kaum Appetit und sind sexuell desinteressiert; bei Frauen kommt die Menstruation zum Erliegen. Mißt man die Stress-Hormone, dann ist besonders eine permanent übersteigerte Cortisol-Produktion auffällig.

Ob dadurch die Immunabwehr geschwächt ist bleibt allerdings unklar. Es gibt dazu zwar viele Studien – aber nur in einigen ergab sich ein solcher Zusammenhang, in anderen gerade nicht. Es ist indes möglich, daß der Effekt lediglich in manchen Fällen auftritt, denn eine Depression kann verschiedenste geistig-seelische sowie stoffwechselbedingte oder andere biochemische Ursachen haben.

Der hohe Cortisol-Spiegel geht hauptsächlich auf eine Überproduktion von CRH zurück, und die hat ihre Ursache in einem Defekt im Hypothalamus oder in einer ihm übergeordneten Instanz. Die Stress-Achse unterliegt damit nicht mehr voll den sie normalerweise wieder herunterregulierenden Mechanismen und ist deswegen chronisch aktiviert.

Für diese Vermutung spricht auch, daß die gegen Depressionen verabreichten tricyclischen Antidepressiva (so genannt nach dem molekularen Grundgerüst aus drei Kohlenstoffringen) offenbar auf Komponenten des Stress-Systems dämpfend wirken. Gibt man nämlich Ratten

Bild 6: Das Stress-Hormon Cortisol beeinflußt Immunzellen über deren Proteinsynthese. Ihre Cortisol-Rezeptoren sind gewöhnlich gefaltet und an große sogenannte Hitzeschockproteine gebunden. Die Bindung löst sich aber, und der Rezeptor entfaltet sich, wenn in die Zelle gelangtes Cortisol an ihn andockt. Daraufhin lagert der Rezeptor sich im Zellkern an eine bestimmte Stelle der DNA an und nimmt so auf die Bildung von Boten-RNA Einfluß, das Zwischenmolekül zwischen Gen und Protein. (Weitere Moleküle, c-fos und c-jun, die sich an den Rezeptor binden, verleihen der Aktion mehr Spezifität.) Die nun produzierten Proteine verlassen die Zelle und beeinflussen direkt die Produktion von Cytokin und von Lymphocyten.

über längere Zeit das in der Humanmedizin oft verwendete Imipramin, sinken die Titer von CRH-Vorstufen in ihrem Hypothalamus beträchtlich; kurzfristig wirkt das Medikament nicht. Auch der Organismus gesunder Menschen mit normalem Cortisol-Haushalt, die zwei Monate lang Imipramin erhielten, bildete nun allmählich weniger CRH; und andere Funktionen der hormonellen Stress-Achse wurden mit der Zeit gleichfalls schwächer.

Des weiteren besteht offenbar manchmal ein Zusammenhang zwischen einer klassischen Depression und einer Entzündungskrankheit. Etwa jeder fünfte Arthritis-Patient hat irgendwann auch eine depressive Phase. Als man dem genauer nachging und Arthritikern einen Fragebogen vorlegte, mit dem man sonst die Gemütskrankheit zu diagnostizieren pflegt, kreuzte praktisch jeder von ihnen fast alle der rund ein Dutzend dafür typischen Punkte an.

Folgerungen für Vorsorge und Behandlung

Seit längerem haben sich Ärzte bei einer entzündlichen Erkrankung außer um erkennbare direkte Ursachen vor allem um die damit verbundenen chronischen Schmerzen und den drohenden körperlichen Abbau gekümmert und sonstige, insbesondere seelische Belastungen als eher nebensächlich abgetan. Die Aufdeckung des engen Zusammenspiels von Stress- und Immunsystem aber könnte endlich die gleichzeitige Anfälligkeit beispielsweise für Arthritis und Depression erklären, wenn sich der Ver-

dacht erhärtet, daß beides durch dieselbe hormonelle Fehlsteuerung verursacht ist. Welches Krankheitsbild dann akut wird, dürfte von der Art des verursachenden Störreizes – ob entzündungsfördernd oder psychisch belastend – abhängen. Daran könnte es auch liegen, daß das Auf und Ab von Depressionen bei Arthritikern keineswegs immer mit den Entzündungsschüben parallel verläuft.

Die neuen Befunde bestätigen also die Alltagserfahrung, daß eine belastende Situation eine Entzündungskrankheit verstärken und umgekehrt ein günstiger Wandel der Lebensumstände dem körperlichen Befinden des Patienten aufhelfen kann. Es läßt sich auch gut vorstellen, wie mentale Übungen gegen Stress-Empfindlichkeit die Immunlage verbessern.

Noch weiß man jedoch nicht, inwieweit die Art der Reaktion auf Belastungen einen genetischen Hintergrund hat und in welchem Maße sie bewußt zu kontrollieren ist. Teilweise erblich bedingt ist wohl, bei welcher Reizstärke und wie intensiv das Stress-System anspringt; die hormonelle Empfindlichkeit ist ja ebenfalls individuell verschieden. Entsprechend variabel sind Schwere und Dauer von Krankheitsschüben bei Patienten in sonst gleichen Lebensumständen.

Den Konnex von Stress und Infektanfälligkeit belegen auch Versuche am Menschen. Bei freiwilligen Testpersonen etwa, denen eine bestimmte Menge gewöhnlicher Schnupfenviren verabfolgt wurde, verschleimten die oberen Atemwege stärker und sonderten auch mehr Viruspartikel ab, wenn die Menschen gestresst waren; und bei Medizinstudenten entwickelte sich nach einer Hepatitis-Impfung während des Examens kein voller Immunschutz. Bei geistiger Erschöpfung und starker körperlicher Beanspruchung sollte man mithin Impftermine besser verschieben.

Gleichsinnig verliefen Experimente an Tieren, die mit Menschen anzustellen unzulässig wäre:

– So erkrankten mit Grippeviren infizierte Mäuse unter Stress nicht nur stärker als nicht gestresste; auch die hormonelle Stress-Achse und das sympathische Nervensystem waren bei Stress mehr in Mitleidenschaft gezogen. Ähnliche Effekte scheinen bei vielen Viruserkrankungen aufzutreten. Möglicherweise ist damit sogar zu erklären, weshalb sich Stress ungünstig auf den Verlauf von AIDS auswirken kann.

– Mäuse, die zugleich Mykobakterien und Aufregung ausgesetzt waren, infizierten sich leichter mit den Tuberkuloseerregern als jene, die zwar im infektiösen Milieu lebten, ansonsten aber ihre Ruhe hatten.

– Bei Ratten verlief eine massive Salmonellen-Infektion nicht tödlich, wenn ihre hormonelle Stress-Achse intakt war.

Vor diesem Hintergrund löst sich das Rätsel, wieso man die Immunreaktionen von Tieren allein durch Dressur beeinflussen kann. Robert Ader und Nicholas Cohen von der Universität Rochester (Bundesstaat New York) gaben Ratten öfter Wasser zu trinken, das etwas Saccharin und ein Immunsuppressivum enthielt; nach einiger Zeit genügte das süße Getränk ohne das Medikament, die Abwehrfunktionen weiterhin zu dämpfen.

Da das soziale Umfeld unsere Grundgestimmtheit wesentlich mitbestimmt, wundert es nicht, daß psychische Stressoren wie zwischenmenschliche Probleme und Spannungen schließlich auch die Immunabwehr beeinträchtigen können. Einer Studie zufolge waren solche Personen besonders erkältungsanfällig, die mehr als zwei Monate lang beständig sozialem Druck und Ärger ausgesetzt waren. Auch wer Angehörige über längere Zeit pflegt, hat leicht selber geschwächte Abwehrkräfte, so Ehepartner von Alzheimer-Kranken. Von unglücklich verheirateten oder in Scheidung lebenden Paaren allerdings scheinen öfter die Frauen diese Situation schwerer zu bewältigen; bei jenen, die sich dann äußerst hilflos fühlten, fanden sich nicht nur besonders viele Stress-Hormone, sondern auch verminderte Immunwerte – nicht aber bei den Männern.

Umgekehrt dämpft ein Netzwerk sicherer, stützender und harmonischer Beziehungen die Empfänglichkeit für Stress und festigt die Abwehr. Auch eine Gruppentherapie kann dazu beitragen. Ein verläßliches Umfeld stützt auf diese Weise selbst Schwerkranke; es gibt sogar Hinweise, daß Frauen mit Brustkrebs dann länger leben.

Bei chronischen Krankheiten bot früher ein längerer Aufenthalt in einem Kurort oder Sanatorium oft die einzige Hoffnung. Das half manchmal tatsächlich, und dies läßt sich nun besser begründen: Entspannung durch völlige Abkehr vom Alltag kann bewirken, daß gestörte Kontakte zwischen Immunsystem und Gehirn sich wieder einregeln und normalisieren. Dies stärkt vor allem die Abwehrkräfte – die erste Voraussetzung für eine Genesung. Das gilt auch heute noch, wenngleich man solche heilsamen Prozesse inzwischen medikamentös zu unterstützen vermag.

Alles in allem ist die scharfe Trennung zwischen psychischen und organischen Krankheiten überholt. Körper und Seele, so erweist die Psychoneuroimmunologie, sind eng verknüpft.

Esther M. Sternberg und **Philip W. Gold** arbeiten am amerikanischen Nationalen Institut für geistige Gesundheit in Bethesda (Maryland) über die Beziehungen zwischen Stress und Immunsystem. Esther Sternberg leitet dort die Abteilung für Neuroendokrinologie und Verhalten, Gold den Zweig der klinischen Neuroendokrinologie. Esther Sternberg hat an der McGill-Universität in Montreal (Kanada) in Medizin promoviert; ihre grundlegenden Forschungen zur biochemischen Kommunikation zwischen Gehirn und Immunsystem haben die Akzeptanz der Psychoneuroimmunologie wesentlich gefördert. Gold hat an der Duke-Universität in Durham (North Carolina) und an der Harvard-Universität in Cambridge (Massachusetts) Medizin studiert. Seine Arbeitsgruppe in Bethesda war unter den ersten, die einen Zusammenhang zwischen Depressionen und Stress-Hormonen nachgewiesen haben.

Literaturhinweise

Netzwerk Mensch. Den Verbindungen von Körper und Seele auf der Spur. Von Gaby Miketta. Rowohlt, Reinbek 1994.

Kommunikationsnetzwerke im Körper. Psychoneuroimmunologie – Aspekte einer neuen Wissenschaftsdisziplin. Herausgegeben von Kurt S. Zänker. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 1991.

Psychoneuroimmunologie. Herausgegeben von Manfred Schedlowski und Uwe Tewes. Spektrum Lehrbuch. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 1996.

Stress. Spektrum der Wissenschaft, Mai 1993, Seiten 92 bis 109.

Stress: Mechanisms and Clinical Implications. Von G. P. Chrousos, R. McCarty, K. Pacak, G. Cizza, Esther M. Sternberg, Philipp W. Gold und R. Kvetnansky in: Annals of the New York Academy of Sciences, Band 771, 1995.

Emotions and Disease: From Balance of Humors to Balance of Molecules. Von Esther M. Sternberg in: Nature Medicine, Band 3, Heft 3, Seiten 264 bis 267, März 1997.

The Neurologic Basis of Fever. Von Clifford B. Saper und Christopher D. Breder in: New England Journal of Medicine, Band 330, Heft 26, Seiten 1880 bis 1886, 30. Juni 1997.

Im WWW Informationen zum Thema bei den amerikanischen National Institutes of Health in Bethesda (Maryland) unter: http://ohrm.od.nih.gov/ose/snapshots/

Weiteres Informationsmaterial über den Audi A8 V6 TDI und dem einzigartigen Audi Space Frame ASF aus Aluminium senden wir Ihnen gerne



Es gibt eine Luxus-Limousine, die weiter kommt als andere, weil sie weiter ist als andere: den Audi A8 V6 TDI. Denn er kombiniert den Audi Space Frame ASF aus Aluminium mit dem neuentwickelten V6 TDI. Ein visionäres Konzept, das neue Maßstäbe bei Laufruhe, Kraftentfaltung und Reichweite setzt.

zu. Sie erreichen uns per Telefon 01 80/5 51 88, per Fax 01 80/5 51 89, über T-Online *Audi# oder im Internet unter http://www.audi.de.

Audi
Vorsprung durch Technik



Das Perpetuum Mobile
hat noch keiner erfunden.

Aber einige sind nah dran. Audi A8 V6 TDI,
der Beginn einer neuen Ära.



Digitale Klangerzeugung

Spezielle Hard- und Software macht aus Computern Musikinstrumente, die Töne und Geräusche gleichermaßen erzeugen können. Verschiedene Verfahren modellieren den Klang oder das ihn hervorbringende Instrument. Das Hörerlebnis kommt dem bei akustomechanischen Vorbildern immer näher, doch auch noch bislang ungehörte Klänge lassen sich formen.

Von Thoralf Abgarjan und Klaus-Dieter Linsmeier

Perkussive, schnelle Rhythmussequenzen, seltsam schwebende Klangflächen und vieles mehr werden zunehmend digital – also mit Computern – berechnet und erzeugt. Das Anwendungsspektrum dieser universalen Technik reicht vom Keyboard des Musikschülers über die Produktionsstätten der Designer von Special Effects bis hin zu den ausgefallenen Erlebnisangeboten von Performancekünstlern. Multimedia-Anwendungen und Computerspiele wären ebenso wie die recycelten Produkte heutiger Musikindustrie ohne digitale Klangerzeuger nicht mehr denkbar.

Die Möglichkeiten aktuell verfügbarer Hard- und Software haben diese Entwicklung stark beeinflußt. In den fünfziger Jahren waren nur wenige Hochschulen mit Großrechnern ausgestattet, die zudem allen ihren Instituten zur Verfügung standen – Rechenzeit war somit begrenzt. Erst in den sechziger Jahren konnten sich eigens gegründete Musikforschungszentren nur für musikalische Zwecke eingesetzte Maschinen leisten. Die massenhafte Verbreitung synthetischer Musik begann freilich erst in den achtziger Jahren mit dem Aufkommen verschiedener Desktop-Computer, des MIDI-Standards für die Steuerung von Synthesizern (siehe Kasten Seite 84) und der Frequenzmodulation als erster, mit preiswerten Chips realisierbarer Form digitaler Klangerzeugung.

Die direkte Synthese

Wird eine Signalwelle in kurzen Zeitabständen abgetastet und ihr momentaner numerischer Wert gespeichert, kann man diese Zahlenfolge wieder in Spannungswerte umsetzen und damit einen Lautsprecher ansteuern. Auf diese Weise läßt sich ein analoges, also kontinuierliches Signal in ein digitales, also aus diskreten Werten bestehendes umwandeln und vice versa.

Nach dem von dem amerikanischen Ingenieur und Mathematiker Claude Elwood Shannon, damals Mitarbeiter der Bell-Telephone-Laboratorien in Murray Hills (New Jersey), 1948 gefundenen Sampling-Theorem (nach englisch *sample*, Probe) ist zur Rekonstruktion der ursprünglichen Welle allerdings zur Abtastung beziehungsweise Wiedergabe eine doppelt so hohe Frequenz wie die höchste im analogen Signal vorkommende erforderlich (vergleiche „Digitale Tonwiedergabe" von John Montforte, Spektrum der Wissenschaft, Februar 1985, Seite 94). Für Compact Disks als Tonträger verwendet man deshalb zum Sampeln 44,1 Kilohertz entsprechend einer maximalen Schwingung von 22,05 Kilohertz – die Grenzfrequenz des menschlichen Gehörs liegt bei maximal 20 Kilohertz.

Der Ingenieur Max V. Matthews untersuchte Mitte der fünfziger Jahre bei den Bell-Laboratorien, ob sich die neue Digitaltechnik zur Spracherzeugung nutzen ließe, weil binäre Signale weit weniger störanfällig als analoge über Telephonleitungen zu transferieren sind. Dabei entstand 1957 das erste Programm der Welt zur Erzeugung synthetischer Klänge, Music I. Es berechnete diskrete Werte einer Schallwelle, genauer gesagt die erforderlichen Spannungswerte zur Ansteuerung eines Lautsprechers; man spricht deshalb von direkter Klangsynthese (vergleiche „Der Computer als Musikinstrument" von Max V. Matthews und John R. Pierce, Spektrum der Wissenschaft, April 1987, Seite 122). Allerdings erlaubte die Rechnertechnik damals nur, 5000 Zahlen pro Sekunde in Spannungswerte umzuwandeln – 10 000 bis 50 000 wären nach dem Sampling-Theorem erforderlich gewesen. Deshalb teilte Matthews den Prozeß in zwei Phasen: In der ersten berechnete ein Computer die Momentanwerte des Signals und legte sie auf Magnetband ab; in der zweiten erfolgten die Digital-Analog-Wandlung und die akustische Umsetzung (Bild 1 oben).

Um das Komponieren zu vereinfachen, simulierte das Programm ab der dritten Version Oszillatoren, die sich zu virtuellen Instrumenten verknüpfen ließen. Sie waren programmierbar; die resultierende Schallwelle wurde berechnet, wenn das Programm die Kompositon abspielte. Ende der sechziger Jahre ent-

stand schließlich Music V, das nicht mehr an Rechner bestimmter Hersteller gebunden war und fortan in den Zentren für Computermusik weltweit genutzt wurde. Indem Wellenformen der Oszillatoreinheiten bereits abrufbereit als diskrete Werte in Tabellen gespeichert waren, verkürzte man die Rechenzeit.

Zur massenhaften Verbreitung war das Verfahren aber nicht geeignet, denn es verging zuviel Zeit zwischen Datengenerierung und Hören. In den sechziger Jahren mußten beispielsweise Musikwissenschaftler der Universität Princeton (New Jersey) einmal pro Woche die Magnetbänder ihrer Kompositionsversuche zu den 150 Kilometer entfernten Bell-Laboratorien zur Digital-Analog-Wandlung fahren. Noch unerfahren in der Technik, erhielten sie häufig als Ergebnis nur Stille oder nicht beabsichtigte Geräusche. Von einer Darbietung in Echtzeit, wie ein herkömmliches akustomechanisches Instrument sie ermöglicht, war man weit entfernt.

Matthews und der Komponist F. Richard Moore, mittlerweile am Institut für Musik der Universität von Kalifornien in San Diego, entwickelten deshalb eine Variante von Music V, die sie nach *generated real-time operations on voltage-controlled equipment* GROOVE nannten. Wie der Name sagt, wurden nicht Klänge berechnet, sondern Steuersignale, die Digital-Analog-Wandler in Spannungswerte umsetzten. Diese wiederum kontrollierten Komponenten analoger elektronischer Instrumente, wie sie auch etwa im damals populären Moog-Synthesizer verwendet wurden. GROOVE ließ sich mit einer Klaviatur und verschiedenen zusätzlichen Reglern spielen. Die erforderliche Datenübertragungsrate war so auf 100 bis 200 Spannungswerte pro Sekunde reduziert. Zudem füllte der verwendete Rechner, wie Moore später scherzhaft meinte, nur noch ein Appartment statt eines ganzen Hauses aus.

Die additive Synthese

Klänge entstehen aus der Überlagerung von Grundschwingung und Partialtönen höherer Frequenz. Nach dem Theorem des französischen Mathematikers und Physikers Joseph Fourier (1768 bis 1830) läßt sich jede harmonische Schwingung solchermaßen in Sinusschwingungen zerlegen und auch daraus wieder aufbauen. Partialtöne geben einem Instrument seine Klangfarbe; bei einer harmonischen Schwingung wie der eines Geigentons sind diese Frequenzen geradzahlige Vielfache der Grundschwingung, hingegen bei nichtharmoni-



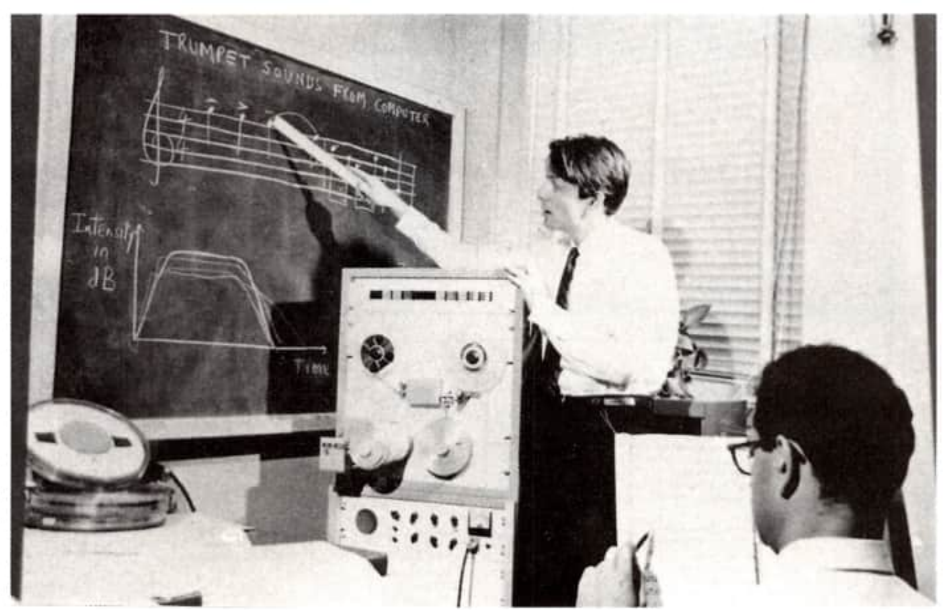


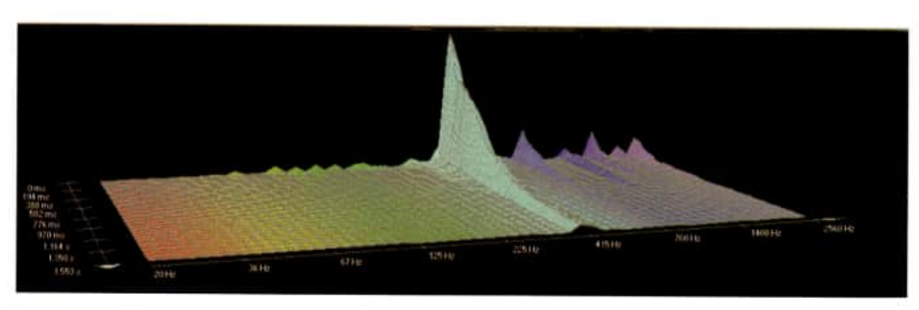
Bild 1: In den fünfziger Jahren untersuchte der amerikanische Ingenieur Max V. Matthews bei den Bell-Laboratorien, ob sich Computer zur Spracherzeugung eigneten und entwickelte – darauf aufbauend – das weltweit erste Programm für synthetische Musik. Entsprechend damaliger Computertechnik war es auf Lochkarten gespeichert (oben). Das Programm berechnete in einem ersten Schritt die additiv von simulierten Oszillatoren erzeugten Schwingungen, die – auf Magnetband gespeichert – in einem zweiten von einem Digital-Analog-Umwandler hörbar gemacht wurden. Der französische Komponist und Physiker Jean-Claude Risset suchte 1965 damit Trompetentöne zu synthetisieren und fand dabei heraus, daß sich die Frequenzspektren der natürlichen Vorbilder, während sie erklingen, ändern (unten). Nach wie vor läßt sich solche Komplexität schwer mit additiver Synthese modellieren.

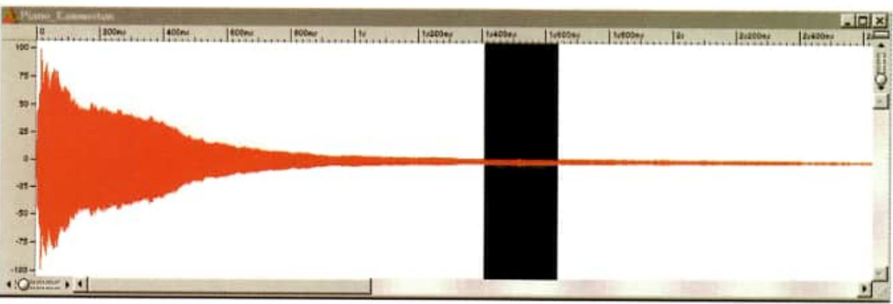
schen Schwingungen wie dem Klang einer Glocke überwiegend ungeradzahlige.

Somit könnte ein Klangspektrum additiv aus Sinusschwingungen aufgebaut werden; ein entsprechendes Programm müßte dann die Wellenformen unabhängiger Oszillatoren berechnen. Der französische Komponist und Physiker Jean-Claude Risset erkannte jedoch 1965 während eines Aufenthaltes in den Bell-Laboratorien, daß sich Spektren natürlicher Instrumente, während sie klingen, verändern (Bild 1 unten). Sein Studienobjekt war die Trompete. Er fand auch, daß die Zahl hochfrequenter Partialtöne mit der Lautstärke eines Tones zunimmt. Inzwischen kennt man solche Varianzen auch von anderen Instrumenten. So hängt der Anteil hoher Obertöne beim Klavier auch von der Intensität des Anschlags ab; außerdem verringert sich dieser Anteil beim Abklingen des Tons stärker als jener der tiefen Frequenzen. Folglich werden zur Darstellung eines Spektrums nicht nur die verschiedenen Oberschwingungen benötigt, sondern auch jeweils der als Hüllkurve bezeichnete zeitliche Verlauf des Pegels (Bild 2).

Selbst heutige Computer vermögen die additive Synthese eines komplexen Klangspektrums wie dem eines Klaviers mit zahlreichen, sich wandelnden Partialtönen nicht in Echtzeit zu leisten. Entsprechende kommerzielle Mikrochips bieten etwa 32 Oszillatoren, ein Klavierton setzt sich aber aus Hunderten von Sinusschwingungen zusammen. Zudem trägt insbesondere bei einigen Blasinstrumenten wie der japanischen Shakuhachi-Flöte farbiges Rauschen zum charakteristischen Klang bei, und ein Rauschspektrum besteht sogar aus unendlich vielen Partialschwingungen (hat es ein Maximum bei einer Frequenz, bezeichnet man es als farbig, bei völliger Gleichverteilung als weiß).

Forschungszentren entwickeln deshalb schnellere Algorithmen. So gelang Xavier Rodet und Philippe Depalle vom Pariser Institut de Recherche et Coordination Acoustique/Musique (IRCAM) mittels inverser Fourier-Transformation, den Rechenaufwand der additiven Synthese auf ein Zehntel bis ein Dreißigstel zu reduzieren. In einfacher Form nutzt man sie aber noch immer vor allem zur Imitation von Orgelklängen. Bei diesen Instrumenten wird die Grundschwingung, eine stehende Welle in einem Rohr, vorwiegend durch zusätzliche kürzere Rohre klanglich gefärbt. Deren Partialtöne bleiben während der Luftzufuhr weitgehend konstant, das abstrakte Modell des Klangs fällt also vergleichsweise einfach aus (vergleiche „Orgelpfeifen" von Neville H. Fletcher und Suszanne Thwaites, Spektrum der Wissenschaft, März 1983, Seite 96).





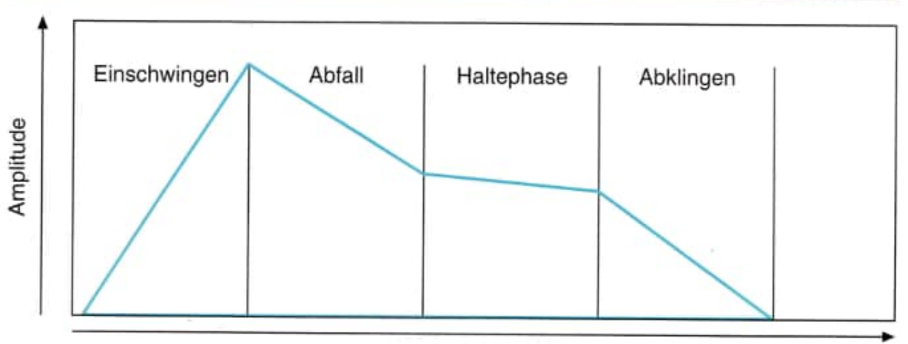


Bild 2: Das Frequenzspektrum eines von akustomechanischen Instrumenten hervorgebrachten Tones – hier der Kammerton a[1] eines Klaviers – enthält außer der Grundschwingung zahlreiche Partialtöne, die dem Klang seine charakteristische Färbung geben (oben). Diese Anteile verändern sich während der Dauer des Tones, wie die Hüllkurve des Gesamtpegels zeigt (Mitte). Bei der elektronischen Klangerzeugung unterscheidet man deshalb verschiedene Phasen (unten). Die Einschwingphase wird dann etwa bei Samplern vollständig, das Abklingen durch Wiederholen signifikanter Passagen, wie der schwarz unterlegten im mittleren Bild, modelliert.

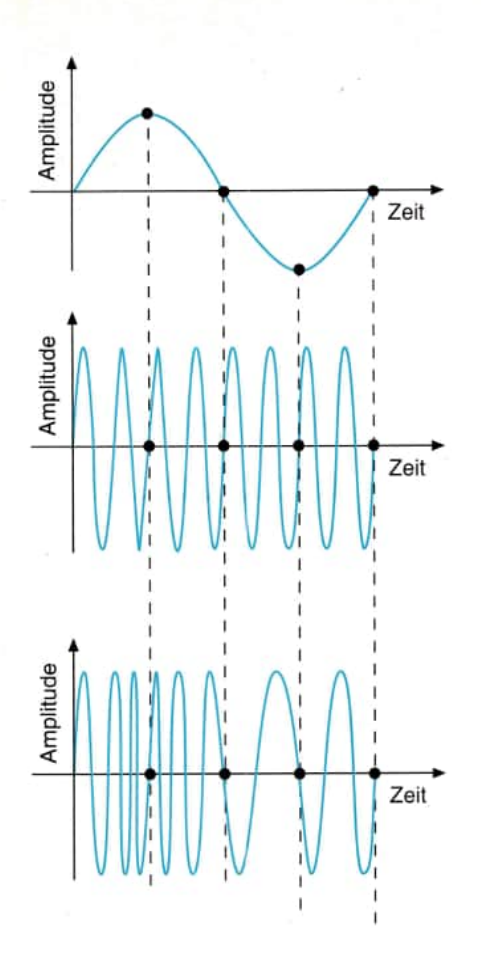
Frequenzmodulation

John M. Chowning übertrug Ende der sechziger Jahre das in der Rundfunktechnik etablierte Verfahren der Frequenzmodulation (FM) auf hörbare Schwingungen. Durch einen Zufall, wie er selbst stets erzählte, begründete Chowning dabei den kommerziellen Erfolg digitaler Synthesizer.

Der Doktorand der Universität Stanford (Kalifornien) untersuchte die Effekte extremen Vibratos mit Music V. Beim Vibrato wird die Frequenz eines Tons, also seine Höhe, durch eine zweite Schwingung beeinflußt; man spricht von Träger und Modulator (bei Veränderung der Amplitude des ersten entsteht musikalisch ein Tremolo). Dabei bestimmt die momentane Amplitude des modulierenden Signals, wie stark sich die Tonhöhe des Trägers verändert (Bild 3).

In der Rundfunktechnik verwendet man dieses Verfahren, um einer hochfrequenten elektromagnetischen Trägerwelle eine Nachricht aufzuprägen und so den Eigenschaften des jeweiligen Übertragungsmediums anzupassen; Amplitudenmodulation ist im Kurz-, Mittel- und Langwellenbereich gebräuchlich, Frequenzmodulation für Ultrakurzwellen. Normalerweise ist die Modulationsfrequenz – bei technischen Anwendungen die der Nachricht – um drei bis vier Zehnerpotenzen kleiner. Erhöht man sie aber, bis sie sich der des Trägers nähert, formiert sich das gesamte Klangspektrum neu (Bild 4).

Chowning hatte dies nach eigener Aussage versehentlich getan. Das Ergebnis war ein neuer, eigenständiger Ton. Aus Summen- und Differenzfrequenzen der Signale entstanden nämlich zusätzliche Partialtöne ober- und unterhalb der



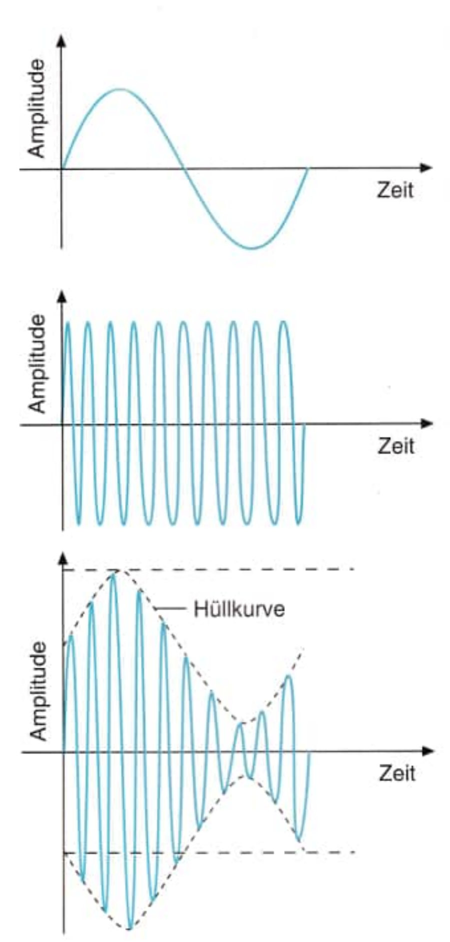


Bild 3: Moduliert man die Frequenz einer Schwingung mit einer niederfrequenteren, entsteht ein Vibrato (links); moduliert man die Amplitude, ein Tremolo (rechts).

Trägerfrequenz, sogenannte Seitenbänder. Ihre Tonhöhen werden im wesentlichen durch das Frequenzverhältnis der beiden Ausgangssignale bestimmt; ist es ganzzahlig, sind die Partialtöne harmonisch, ist es ungeradzahlig, ergeben sich unharmonische Spektren wie bei Glokken oder Gongs. Zahl und Amplituden der Seitenbänder beziehungsweise Partialtöne sind abhängig von der Amplitude des Modulators, der sogenannten Modulationstiefe. Erzeugt man beispielsweise unharmonische Spektren mit einer Modulationsfrequenz, die höher ist als die des Trägers, ergibt sich ein schlagzeugähnliches Klangbild mit breit gestreuten Partialtönen.

Zudem lassen sich den Schwingungen von Träger und Modulator zeitlich variable Hüllkurven zuweisen (Bild 2 unten): Wie bei analogen Synthesizern unterscheidet man dabei die Phasen Einschwingen auf einen maximalen Wert (*attack*), Abklingen auf einen tieferen (*decay*), Halten dieser Amplitude (*sustain*) und schließlich, nach Loslassen der Taste, Abklingen auf null (*release*). Des weiteren kann man mehrere FM-Wellenformen addieren.

Derartige Träger-Modulator-Systeme lassen sich aus wenigen und vergleichsweise einfachen elektronischen Operatoren aufbauen, FM war somit für eine kommerzielle Anwendung gut geeignet. Die japanische Firma Yamaha erwarb die Lizenzrechte von der Universität Stanford und brachte 1983 den Synthesizer DX-7 für etwa 2000 Dollar auf den Markt; er wurde innerhalb weniger Jahre rund eine halbe Million mal verkauft.

Im Unterschied zu analogen Synthesizern, bei denen man Einstellungen von durch Probieren gefundenen Klängen notieren mußte (sie wurden oft mittels Klebebändern an den Reglern fixiert), ermöglichte das digitale Produkt perfekte Reproduzierbarkeit der programmierten Sounds. Der DX-7 war zudem als einer der ersten Synthesizer mit einer MIDI (*musical instrument digital interface*) -Schnittstelle ausgestattet und somit per Computer zu steuern (siehe Kasten Seite 84). Mittlerweile sind FM-Chips Bestandteil vieler Soundkarten in Heimcomputern.

Die Frequenzmodulation ist eine sehr flexibel einsetzbare Technik. Kommerziell erfolgreiche Tongeneratoren haben gegenwärtig vier bis acht Operatoren, die sowohl die Träger- wie die Modulatorschwingung erzeugen können und vielfältig kombinierbar sind; die Hüllkurve wird von einem eigenen Generator erzeugt. Ein in den DX-7 eingebauter Analogeingang zum Anschluß eines Blaswandlers, der wie der Name sagt durch Blasen erzeugte Luftdruckschwankungen in Steuersignale umsetzt, eröffnet zusätzliche Möglichkeiten, Töne zu beeinflussen und lebendig zu gestalten.

Um den Klang einer Orgel nachzubilden, benutzt man die Frequenzmodulation zur additiven Synthese. Dazu werden zwei oder mehr Schwingungen durch Parallelschalten von mindestens zwei Operatoren addiert, deren Frequenzen in einem ganzzahligen Verhältnis stehen. Des weiteren ist das Verfahren nicht auf Sinusschwingungen für Träger- und Modulatorsignal festgelegt. Bei der *advanced frequency modulation* (AFM) werden davon abweichende Funktionen benutzt, die sogar von Samples – also digitalisierten Wellenfunktionen – abstammen können.

Die allgemeine mathematische Beschreibung der resultierenden FM-Zeitfunktion hat die Form einer Bessel-Funktion, benannt nach dem Königsberger Astronomen und Mathematiker Friedrich Wilhelm Bessel (1784 bis 1846). Während eine additive Synthese intuitiv zu gestalten ist, entzieht sich die mathematisch komplexere Frequenzmodulation solch leichtem Zugang. Mit zusätzlichem Rechenaufwand lassen sich aber Hilfsmittel wie Umrechnungen von Bessel- in Fourier-Koeffizienten bereitstellen.

Freilich kann man damit mechanoakustische Vorbilder nicht realitätsnah nachahmen; aber das würde auch dem abstrakten Modell widersprechen. So ist verständlich, daß die Imitation etwa eines Klaviers oder einer Geige mit den FM-Chips einfacher Soundkarten nicht überzeugt – sie ist nicht die Bestimmung des Verfahrens. Mittels Frequenzmodulation synthetisierte Klänge haben ihren eigenen Charakter. Sie können sowohl sehr weich wie sehr brillant sein und eignen sich ausgezeichnet für druckvolle Bass- und Synth-Bläser- oder Orgelklänge. Einige E-Piano-Sounds des DX-7 wurden in der Popmusik sogar zu Klassikern und finden sich auch in den im folgenden beschriebenen Sample-Playern.

Das Sampling

Die Weiterentwicklung der Digital-Analog- beziehungsweise der Analog-Digital-Wandlung, insbesondere aber immer größere und leistungsfähigere Datenspeicher ermöglichten, reale Klänge als Folgen von Abtastwerten zu verwenden. Dazu wandelt man sie zunächst mit

Mikrophon, Piezokristall oder elektromagnetischem Tonabnehmer in ein analoges elektrisches Signal um, das mit der Sampling-Frequenz von meist 44,1 Kilohertz abgetastet, so in ein binäres Signal umgewandelt und in einer Tabelle (Wavetable genannt) abgelegt wird.

Die Wiedergabe erfolgt durch Auslesen der digitalen Werte mit derselben Frequenz aus dem Speicher und Rekonstruktion des analogen Signals mit einem Digital-Analog-Wandler. Das Ergebnis, nochmals verstärkt, steuert meist eine Lautsprechermembran, und es entstehen Luftdruckschwingungen, also longitudinale Schallwellen.

Beim Digitalisieren wird allerdings nicht nur der zeitliche Verlauf gerastert, sondern auch der Informationsgehalt: Beträgt die Wortbreite des digitalen Signals n Bit, läßt sich damit die Schwingungsamplitude des analogen Signals auf ganze Zahlen von 0 bis 2^n abbilden. Mit den für High Fidelity-Anwendungen üblichen 16 Bit ist somit ein Dynamikbereich zwischen kleinster und größter Amplitude von 0 bis 65 535 darstellbar, das entspricht auf einer logarithmischen Skala 96 Dezibel. (Das menschliche Ohr vermag aber ein Verhältnis von 1 zu 1 000 000 aufzulösen, also 110 Dezibel; aktuelle Bestrebungen, auf 24 Bit Wortbreite überzugehen, sind deshalb wohlbegründet.)

Der Speicherbedarf für Audio-Samples ist recht hoch. Bei der genannten Abtastrate und Wortbreite fallen etwa 5,3 Megabyte (Millionen Byte) an Daten je Aufnahmekanal pro Minute an, das entspricht einer Datenübertragungsrate von fast 90 Kilobyte pro Sekunde – etwa dreimal so viel, wie MIDI maximal ermöglicht. Deshalb setzt man nun für professionelle Zwecke Systeme mit SCSI-Bus (*small computer system interface*) ein (als Bus wird eine Gruppe parallel geführter Leitungen bezeichnet, über die ein Computer Daten, Adressen und Befehle sendet oder erhält). Die derzeit fortschrittlichsten Varianten Wide und Ultra-Wide SCSI bieten eine Wortbreite von 16 beziehungsweise 32 Bit und maximal 40 Megabyte pro Sekunde. Im Unterschied zur MIDI-Leitung ist diese Verbindung bidirektional, die kommunizierenden Einheiten können also gleichzeitig senden und empfangen.

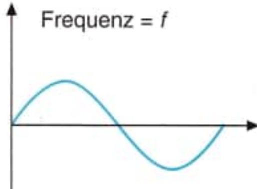
Freilich liegt die Lösung des Problems großer Datenmengen nicht allein in rein technischen Verbesserungen, sondern auch im ökonomischen Umgang mit dem Sampling-Material selbst. Eine möglichst naturgetreue Tonerzeugung läßt durchaus Raum für Einsparungen. Hört man beispielsweise einen einzelnen – originalen – Klavierton, läßt sich ohne besondere musikalische Vorkenntnisse feststellen:

– Sofort nach dem Anschlagen ist er als Klavierton zu erkennen.

– Der Ton erklingt je nach Höhe etwa zehn Sekunden bis zu Minuten, und zwar je tiefer, desto länger. Nach der Einschwingphase klingt er ab, ohne seinen Charakter grundlegend zu ändern, wirkt jedoch zunehmend matter.



Schwingung 1



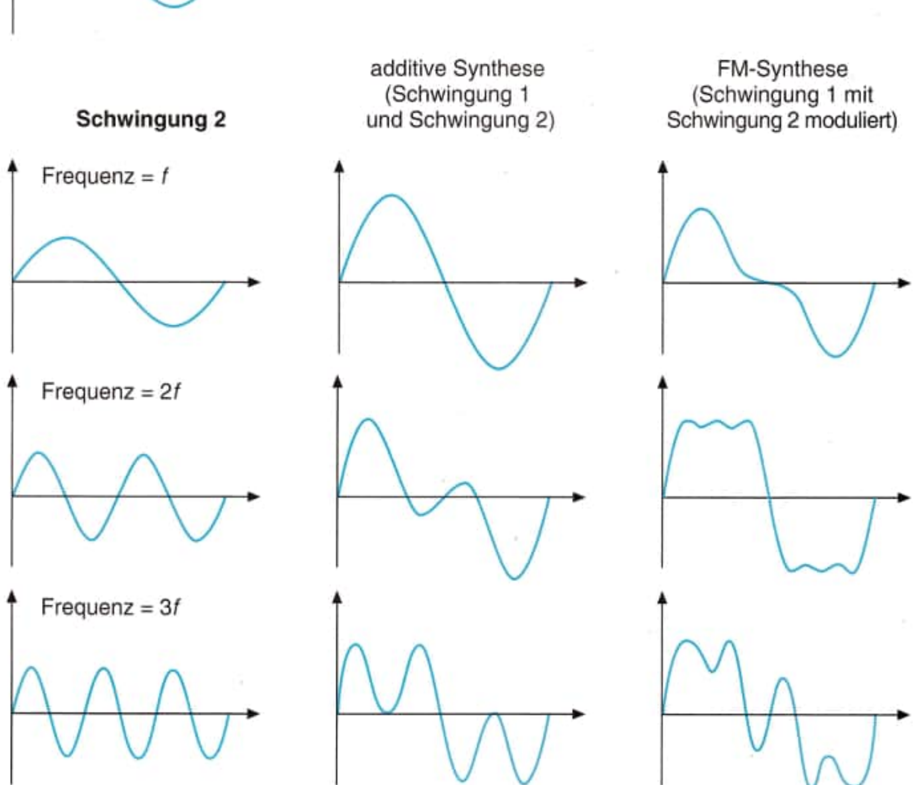


Bild 4: Bei der additiven Synthese überlagert man Wellen vergleichbarer Frequenz, bei der FM-Synthese dient die eine als Träger (Schwingung 1), die andere als Frequenzmodulator (Schwingung 2), daher der Name. Bei letzterem Verfahren entstehen reichlich Partialtöne in Seitenbändern. Einer der ersten FM-Synthesizer war 1983 der DX-7 von Yamaha; er wurde weltweit hunderttausendfach verkauft (oben).

– Das Klangbild ändert sich je nach Anschlagstärke; dasjenige benachbarter Töne ist sehr ähnlich.

– Können andere Saiten durch Resonanz mitschwingen, indem beispielsweise das Haltepedal gedrückt wird, ändert sich der Klang.

Die Wiedergabe des Einschwingvorgangs genügt demnach bereits, den Klang zu identifizieren; je tiefer der Ton ist, desto länger dauert das erforderliche Sample. Es ist aber keineswegs erforderlich, auch das Abklingen komplett anzubieten. In der Praxis wird statt dessen ein vergleichsweise kurzer Zeitabschnitt so lange wiederholt, wie der Ton angefordert wird (bei einem MIDI-Gerät also, bis ein Note-Off-Befehl eintrifft). Eine Amplitudenhüllkurve gibt dabei das Abklingen vor. Mit einer Filterhüllkurve werden die Höhen zusätzlich bedämpft, der Klang wird so matter gemacht. Ein einminütiges monophones Sample, das 5 Megabyte belegen würde, reduziert sich beispielsweise auf 1200 Millisekunden beziehungsweise 0,1 Megabyte für Attack samt erster Ausschwingphase und einen 200 Millisekunden dauernden, mehrfach wiederholten Klangausschnitt, der mit nur 16 Kilobyte zu Buche schlägt.

Um die Dynamik des Anschlags technisch umzusetzen, gibt es mehrere Möglichkeiten: Entweder sampelt man denselben Ton bei mehreren Anschlagstärken und ruft diese Datensätze dann je nach Anschlag der Keyboardtastatur auf, oder ein Sample durchläuft beim Auslesen einen anschlagsabhängigen Filter. Kombinationen beider Methoden sind ebenfalls in Gebrauch. Die Entscheidung darüber, welches Verfahren letztlich angewendet wird, fällt anhand der technischen Möglichkeiten des jeweiligen Tonerzeugers, aber auch nach musikalischem Bedarf: Viele lautstärke-abhängige Samples ergeben einen sehr inhomogenen, Filter allein einen eher statisch wirkenden Klang.

Die Ähnlichkeit in den Klängen benachbarter Noten ermöglicht eine weitere Reduktion des Speicherbedarfs, denn ein Sample läßt sich mehrfach verwenden. Wird es mit der doppelten Sampling-Frequenz ausgelesen, erklingt der betreffende Ton eine Oktave höher, mit der halben eine Oktave tiefer. Dieser Effekt ist vergleichbar dem eines Tonbandes, das mit höherer oder niedrigerer Geschwindigkeit abgespielt wird. Wie aber dabei nicht einfach aus einem Baß ein Tenor wird, sondern aus einem Mann eine Mickey-Mouse, ist dieses Verfahren nur begrenzt anwendbar, weil sich dabei ausnahmslos alle Frequenzanteile gleichmäßig mit verschieben. Doch das Cha-

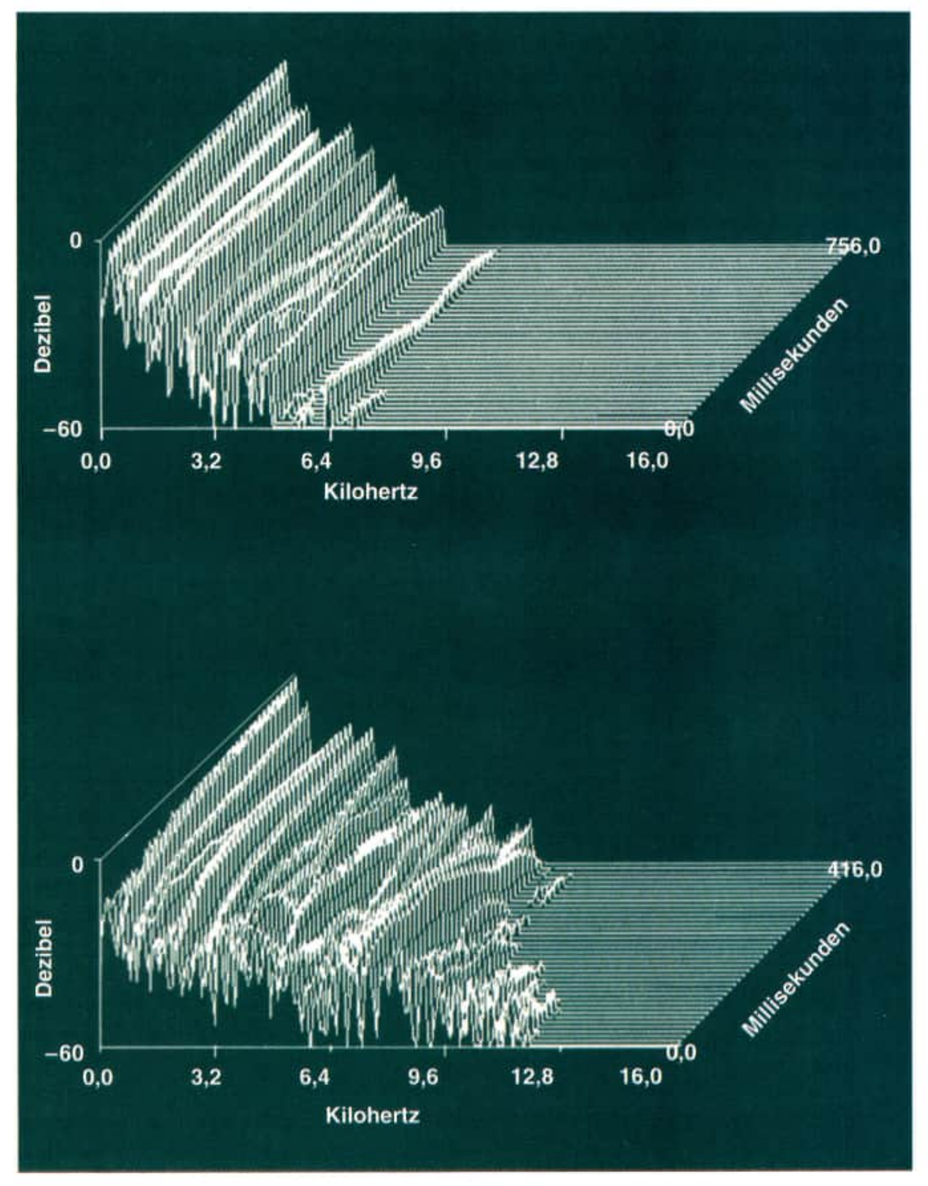


Bild 5: Resonanzen beeinflussen den Klang eines realen Klaviers. Eine Möglichkeit, sie mit der Sampling-Methode zu modellieren, ist, das Spektrum eines Tones – hier des Kammertons a[1] von 440 Hertz – bei bedämpften Saiten (oben) und eines bei aufgehobener Dämpfung, also gedrücktem Pedal (unten), aufzunehmen. Wird ersteres vom zweiten abgezogen, verbleibt der deutlich höherfrequentere Resonanzanteil.

rakteristikum eines Klanges – ob von einem Klavier gespielt oder einem Menschen gesprochen – sind konstante Spektralanteile, die im gesamten Tonumfang enthalten sind. Um diese Formanten weitgehend konstant zu halten, darf ein Sample nur innerhalb eines eng begrenzten Tonbereichs mit variabler Sampling-Frequenz abgespielt werden. Korrekturverfahren, welche die Verschiebung ausgleichen, sind sehr rechenintensiv und deshalb derzeit nur bei der Klangnachbearbeitung, nicht bei Echtzeit-Anwendungen einzusetzen.

Die auf dem Sampling basierenden Klangerzeuger haben vor zwölf Jahren Einzug auf den Markt digitaler Instrumente gehalten, den sie mittlerweile dominieren. Das Angebot umfaßt Klänge verschiedenster Instrumente – auch analoger Synthesizer. Zudem kann der Musiker bei hochwertigen Geräten die Parameter der Hüllkurven und Filter einstellen und Samples untereinander kombinieren, so daß sich neuartige Sounds ergeben. Immer leistungsfähigere Hard- und Software begünstigt auch das Aufnehmen und Ablegen längerer Samples auf die Festplatte; man spricht vom Harddisk-Recording. Sequencer genannte Steuerprogramme für Klangerzeuger ermöglichen häufig, MIDI- und Audio-Daten innerhalb eines einzigen Systems zu verwalten. Überdies gibt es vielfältige Möglichkeiten, die digitalen Daten zu bearbeiten. In den Tonstudios der Musikindustrie dienen solche Verfahren mittlerweile dazu, die Qualität der Aufnahmen zu verbessern, etwa durch selektives Filtern von Zischlauten eines Sängers, oder um Passagen aus schon vorhandenen Quellen neu zu mischen. Komponisten können zu vergleichsweise geringen Kosten Klangmaterial in einer Weise verfremden und umdeuten, wie es noch vor einem Jahrzehnt kaum in den Forschungszentren der elektronischen Musik möglich war.

Doch hat auch das Sampling, trotz dieser vielfältigen Möglichkeiten, bei der Imitation natürlicher Instrumente seine Grenzen. Wie sich das Klangbild, das beim Anschlag einer Klaviertaste entsteht, durch resonantes Mitschwingen anderer Saiten und des Klavierkörpers verändert, vermag man damit nur begrenzt nachzuahmen (eine solche gekoppelte Schwingung moduliert beispielsweise das Abklingen eines Tones). Sobald mindestens zwei Töne gleichzeitig abgerufen werden, liefert die Technik nur die Summe der Einzeltöne. Bei einem Klavier regen sich die Saiten aber entsprechend ihrer Partialtöne zusätzlich gegenseitig an, insbesondere dann, wenn sie ungedämpft sind, also frei schwingen können. Des weiteren hat der Klavierkorpus Eigenresonanzen, die bestimmte Frequenzen verstärken.

Werden die einzelnen auf dem Klavier angeschlagenen Töne mit gedrücktem Pedal – also mit maximalem Resonanzvermögen des Instruments – gesampelt, enthält das Spektrum die Summe aus Klang- und Resonanzanteil (Bild 5). Will man nun ein Klavier realistisch simulieren, müssen beide getrennt werden, um sie beim Spielen des Klangerzeugers gegebenenfalls wieder zu mischen. Das Klangspektrum wird dazu in einen deterministischen und in einen stochastischen Teil zerlegt. Der erste entspricht dem bei normaler Dämpfung gesampelten Signal (darin enthaltene Resonanzen sind in der Praxis vernachlässigbar). Eliminiert man ihn aus dem mit Haltepedal aufgenommenen Sample, erhält man den stochastischen Anteil.

Simulation von Instrumenten

Das letzte Beispiel steht bereits an der Schwelle zu dem modernsten Prinzip der Tonerzeugung, dem *physical modeling* (PM). Statt den Klang von Instrumenten aufzuzeichnen, sucht man sie selbst so gut wie möglich mathematisch zu erfassen und berechnet die Töne, die diese Modelle erzeugen. (Zunächst standen akustomechanische Instrumente im Mittelpunkt des Interesses, und der Begriff wurde gegen die Modellierung von Klängen mit den bereits beschriebenen Verfahren abgegrenzt; mittlerweile simuliert man aber auch die Schaltkreise ana-

loger und digitaler Klangerzeuger und spricht auch hier von PM beziehungsweise virtueller Akustik.) Die tonformenden Parameter sollten sich mit Klaviaturen oder anderen Nachbildungen der originalen Spielmittel in Echtzeit einstellen lassen, die virtuellen Instrumente mithin spielbar sein. Weil die Modelle auch nichtlineare Effekte wie Resonanzen von Saiten oder das Überblasen einer Flöte enthalten sollen, müßte dann – so das Ziel – ein täuschend echter Klang entstehen. Zudem ließen sich Töne erzeugen, die mit akustomechanischen Instrumenten nicht machbar wären. Grundlegende Arbeiten stammen teilweise schon aus den sechziger, entscheidende Impulse aus den achtziger Jahren, doch erst 1994 kamen erste Produkte – die Virtual Acoustic-Synthesizer von Yamaha – auf den Markt.

Meist gliedert man das akustomechanische Vorbild nach Elementen mit linearem Verhalten, wie etwa dem Resonanzkörper, und nichtlinearem, wie etwa dessen Kopplung mit einer Saite oder Luftsäule. Zur Modellierung der Systeme verwendete man zunächst Massen, Federn und Dämpfer oder Oszillatoren entsprechend den Frequenzkomponenten des schwingenden Körpers. Julius O. Smith III vom Center for Computer Research in Music and Acoustics der Universität Stanford nutzte dann aus der Elektronik entliehene Komponenten wie Wellenleiter, Filter und nichtlineare Elemente; auch Kombinationen der Methoden sind gebräuchlich. Es ergeben sich Differentialgleichungen, die meist numerisch zu lösen sind. Die mechanische Modellierung erfordert eine Diskretisierung des räumlichen Objekts, also ein Zerlegen des realen Instruments in einfache geometrische Strukturen wie Quader oder Tetraeder, die nicht immer offensichtlich ist. Zudem erfordert die Berechnung eines Netzes schwingender Punktmassen eine hohe Rechenleistung. In kommerziellen Anwendungen modelliert man damit vor allem lokale nichtlineare Effekte wie das Schwingen von Holzzungen in Blasinstrumenten oder das Schlagen eines Klavierhammers auf eine Saite.

Das Modellieren mit Wellenleitern ist weit verbreitet und wird insbesondere für Blas- und Saiteninstrumente verwendet. Man unterscheidet dabei Modelle mit einem und mit zwei Schwingungssystemen. Das erste beschreibt stehende Longitudinalwellen in einem Rohr, eignet sich also beispielsweise für Klarinette, Saxophon oder Orgelpfeife. Eine gestrichene Saite hingegen wird durch die zwei Systeme Steg-Bogen und Bogen-Griffbrett modelliert.

Ein Wellenleitermodell besteht typischerweise aus Verzögerungseinheiten (englisch *delay*), Digitalfiltern und einem nichtlinearen Erreger. Erstere entsprechen dem Ausbreitungsmedium, das die Welle verzögert und somit ihre Laufzeit vorgibt. Zur Modellierung benötigt man folgende Annahmen:

– Ein Erreger wie das Mundstück einer Klarinette oder ein Bogen erzeugt in dem System, also in Rohr oder Saite, eine stehende Welle;

– deren Grundfrequenz wird von der Rohr- oder Saitenlänge bestimmt;

– den Klangcharakter, also das sich ergebende Partialtonspektrum, formen der Erreger und die mechanischen Reflexionseigenschaften an den Rohrenden, meist durch nichtlineare Filter simuliert;

– instrumenttypisch werden manche Frequenzanteile absorbiert, andere durch Resonanz verstärkt;

– der Schalltrichter eines Blas- beziehungsweise der Resonanzkörper eines Saiteninstruments filtert aus den angeregten Schwingungen Frequenzen aus.

Des weiteren bestimmen Kenntnisse aus der Akustik die Modelle. So gilt etwa bei Blasinstrumenten, daß eine halboffene luftdurchströmte Röhre nur ungerade harmonische Teiltöne liefert und der Durchmesser im wesentlichen die Grenzfrequenz bestimmt. Auch allgemeine Eigenschaften von Wellen gehen ein: An einer Grenzfläche, die Medien mit unterschiedlichen Ausbreitungsgeschwindigkeiten trennt, wird ein Teil einer auftreffenden Welle reflektiert, ein anderer läuft von der ursprünglichen Richtung weggebrochen weiter; trifft die Welle auf ein Hindernis, das klein gegenüber ihrer Wellenlänge ist, wird sie daran gebeugt.

Betrachten wir ein Rohrblattinstrument wie etwa eine Klarinette oder ein Fagott (Bild 6). Der Blasdruck erzeugt den Ton, im Modell als Erregung durch explosionsartige Luftpulse abgebildet; der Zusammenhang zwischen Luftdruck und -strom ist nichtlinear. Es entsteht eine vorwärtsgerichtete Schallwelle, die vom Mundstück beeinflußt wird; im Mo-

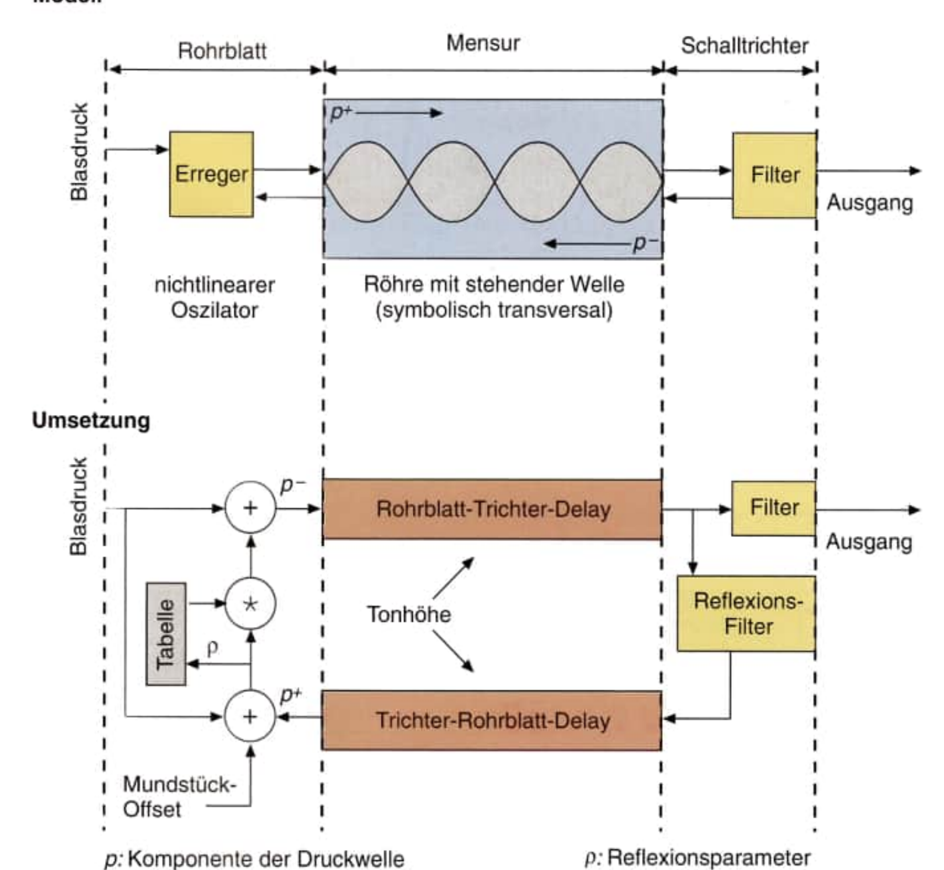


Bild 6: Wellenleiter-Modell eines Holzblasinstruments. In der oberen Hälfte sind die Elemente eines physikalischen Modells dargestellt, wie es sich aus akustischen Messungen und theoretischen Kenntnissen ergibt, darunter die technische Umsetzung in ein System aus Erregern, Verzögerungsleitungen (*delays*) und Filtern. Weil die Schallwelle am Trichter reflektiert wird, gibt es stehende Wellen. Berechnet werden die in die entsprechenden Richtungen laufenden Druckwellen p^+ und p^-. Die modulierende Wirkung auf den Erreger berücksichtigt ein Mundstück-Offset, der oft als konstant angenommen wird. Die Nichtlinearität des Erregers (*) wird nicht in Echtzeit berechnet, sondern ist bereits kalkuliert und in einer Tabelle abgelegt.

dell erfaßt dies ein Parameter. Am Rohrende geht die Welle aus den genannten Gründen teilweise in den Schalltrichter über und wird nach außen übertragen, teilweise reflektiert. Der zurücklaufende Teil modifiziert ebenfalls die Welle am Rohranfang, was sich beispielsweise durch einen weiteren Parameter berücksichtigen läßt. Die Laufzeit durch das Rohrinnere simulieren, wie erwähnt, Verzögerungseinheiten; diese bestimmen schließlich wesentlich die Tonhöhe.

Statt die genannten Nichtlinearitäten zu berechnen, werden in Echtzeit-Systemen die Werte einer Tabelle entnommen. Besonders kompliziert sind die Wechselwirkungen beim Übergang von Erreger und Rohr: Durch die rückwärtslaufende Schallwelle wird der Luftdruck im Mundstück geringer und nimmt sogar negative Werte an. Das Rohrblatt wird dann angesogen und der luftdurchströmte Spalt verkleinert, bis er sich gänzlich schließt. Dies läßt wiederum den Druck im Erreger ansteigen, bis ein neuer Impuls entsteht.

Das Wellenleiter-Modell einer gestrichenen Saite unterscheidet sich davon vor allem dadurch, daß der Bogen sie in ein rechtes und ein linkes Schwingungssystem teilt (Bild 7). Seine Kraft und Geschwindigkeit sowie das Längenverhältnis der schwingenden Saitenanteile charakterisieren das System. Wieder beschreiben nichtlineare Gleichungen die Erregung, und eine Parametertabelle stellt die Funktionswerte in Echtzeit bereit. Ein Filter beschreibt die Verluste bei der Reflexion der Welle am Steg, also beim Übergang auf den Resonanzkörper. Dessen Eigenschaften werden ebenfalls durch Digitalfilter modelliert. Verzögerungsobjekte entsprechen den sich innerhalb der schwingenden Saitenteile ausbreitenden Wellen. Klangbestimmende Randbedingungen wie beispielsweise der Anstellwinkel des Bogens werden entweder in der Parametertabelle berücksichtigt oder mittels Filterfunktionen in das Modell eingebaut.

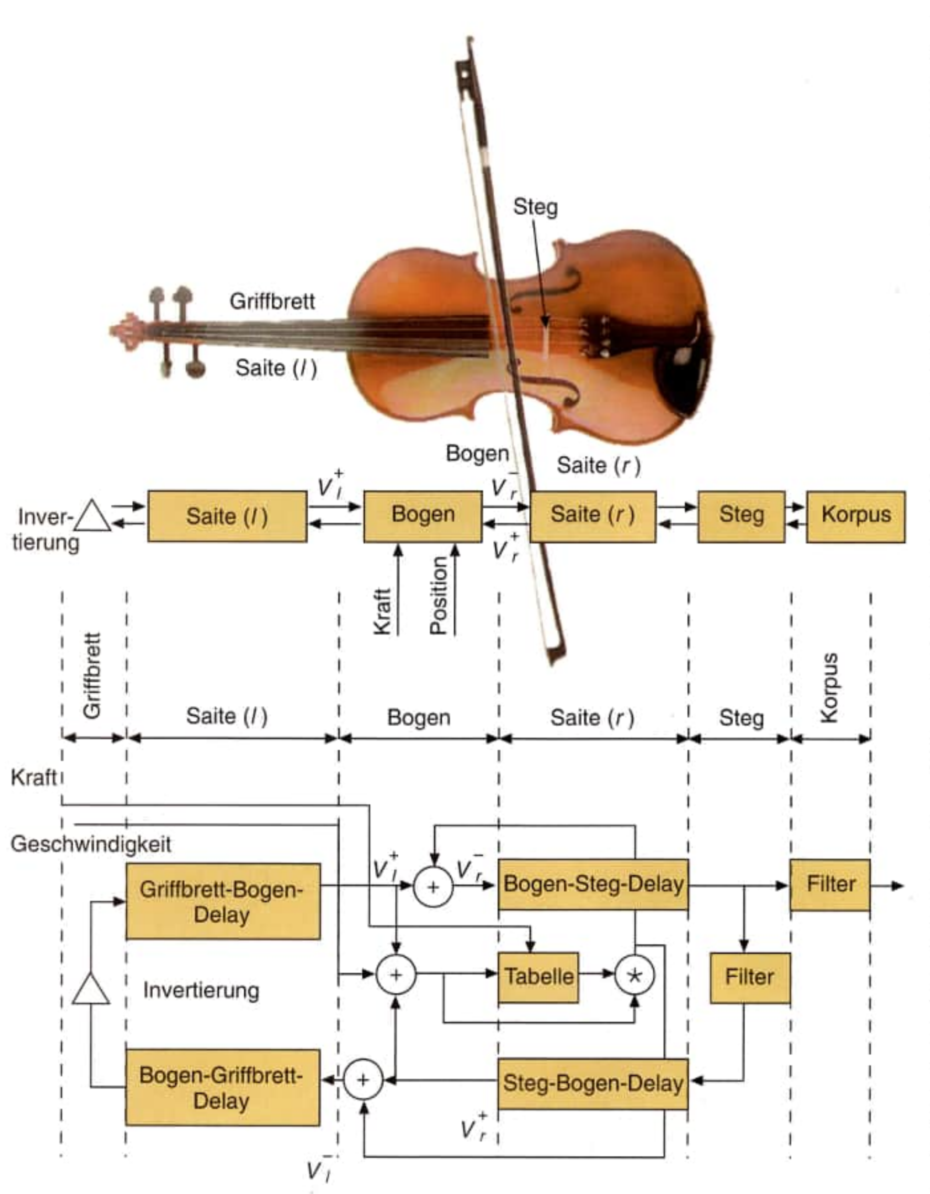


Bild 7: Wellenleiter-Modell einer Violine. Im Prinzip ist der Aufbau dem eines Holzbläser-Modells durchaus vergleichbar, berechnet wird hier aber die Geschwindigkeit v der Wellenausbreitung auf der jeweiligen Saite und in die möglichen Richtungen (+ und –). Allerdings unterteilt sie der Bogen in einen linken und einen rechten Anteil (Indices l und r), die separat zu berechnen sind. Der Resonanzkörper (Korpus) wird als Digitalfilter imitiert; die Wirkung der anregenden Kraft (∗) ist in einer Tabelle abgelegt. Das Modell gilt aber nur für eine einzeln klingende Saite; gleichzeitiges Spielen mehrerer erfordert viele und zudem miteinander gekoppelte Modelle.

Ein weiterer Klassiker der virtuellen Tonerzeugungsverfahren ist das 1983 von Kevin Karplus und Alex Strong während ihrer Studienzeit an der Universität Stanford entwickelte Modell für gezupfte Gitarre (Bild 8). Es benutzt einen perkussiven Laut wie einen kurzen Impuls oder sogar weißes Rauschen zur Anregung einer Verzögerungsleitung. Die ausgelöste Schwingung wird zum Eingang rückgekoppelt und mit dem erregenden Sound gemischt. Regelt man den Anteil des rückgekoppelten Signals entsprechend, entsteht ein exponentiell abklingender Ton. Seine Höhe wird nur durch die Verzögerungslänge bestimmt. Um das Verhalten der abklingenden Schwingung der angeregten Saite noch realistischer zu machen, dämpft ein Tiefpaßfilter im Rückkopplungspfad hochfrequente Partialschwingungen schneller als niederfrequente. Mehrsaitige Systeme wie eine Gitarre werden mit mehreren Erregerblöcken modelliert. Bei Echtzeit-Systemen nutzt man auch bei diesem Verfahren im Erregersystem Tabellen, um Rechenzeit zu sparen. Der Resonanzkörper wird wiederum durch einen Digitalfilter beschrieben.

Diese grundlegenden Modelle lassen sich in vielfältiger Weise ergänzen, um wichtige Phänomene der realen Klangerzeugung zu berücksichtigen. So klingt beispielsweise eine schwach gespannte Saite etwa eines Banjos bei hartem Anschlag zu Anfang etwas schärfer, was sich durch Variation der Grundschwingung modellieren läßt. Anspruchsvoller ist schon, die Schwingungen des Steges zu modellieren. Weil er sich meist senkrecht zum Korpus leichter bewegen kann als parallel dazu, müssen im Grunde schon bei einer einzelnen, schräg angeschlagenen Saite zwei gekoppelte Schwingungen unterschieden werden; dies läßt sich mit zwei Wellenleitern modellieren.

Dicke Klaviersaiten tiefer Töne oszillieren zudem auch longitudinal, also entlang der Saite. Ein dritter Wellenleiter

erfaßt auch diesen Effekt; weil Kompressionswellen schneller laufen, ist er deutlich kürzer als die anderen beiden. Da ein Klavierton von drei resonant schwingenden Saiten durch den Schlag eines Hammers hervorgebracht wird, wären im Grunde je Ton neun gekoppelte Wellenleiter erforderlich. Auch der Resonanzboden darf nicht vergessen werden, den man als großen Digitalfilter oder als Netz von Wellenleitern nachbildet. Die Kunst besteht auch beim *physical modeling* in der Beschränkung auf das absolut Erforderliche im Sinne eines guten Klangergebnisses.

Freilich gibt es nicht nur Beschränkungen durch den derzeitigen Stand der Technik, es sind auch einige Probleme noch nicht gelöst. So vergrößern nichtlineare Effekte bei Rückkopplungen die Zahl der Partialtöne. Ferner ist das Entstehen von Turbulenz in einem Rohr noch nicht zu modellieren. Schließlich sind die physikalischen Vorgänge teilweise nicht exakt beschreibbar, etwa jene im Mundstück von Doppelrohrblattinstrumenten wie der Oboe oder an der Öffnung des Schalltrichters von Blechblasinstrumenten.

Frequenzmodulation, Sampling und *physical modeling* finden sich jetzt in vielen kommerziellen Klangerzeugern, und keine Technik hat die andere wirklich abgelöst. Sie werden entsprechend ihren spezifischen Möglichkeiten und Grenzen genutzt. Mit steigender Leistung und sinkenden Kosten der Hardware wurden und werden immer anspruchsvollere Verfahren einem breiten Anwenderkreis zugänglich. Deshalb dürften auch virtuelle Instrumente in Zukunft noch stärker vertreten sein. Kommerziell erfolgreich sind vor allem kombinierte Systeme, welche die Vorteile eines Tonerzeugungsverfahrens ausspielen und seine Nachteile durch ein anderes kompensieren.

Die Entwicklungen von Frequenzmodulation und Sampling sind weitgehend abgeschlossen. Wichtige Neuerungen vollziehen sich in der virtuellen Akustik. Neue Modelle, neue Methoden und immer wieder neue Klänge werden entstehen. Dabei geht es nicht allein um die perfekte Simulation einer Gitarre, einer Klarinette oder eines Flügels, sondern auch darum, bisher nicht gehörte Klänge zu erzeugen und zu der sich wandelnden musikalischen Ästhetik beizutragen.

Dazu ist freilich erforderlich, die subjektive Wahrnehmung des Menschen in das Kalkül einzubeziehen. Kenntnisse der Psychoakustik tragen zum Entwurf von Instrumenten bei, seien sie real oder virtuell. So vermag das menschliche Gehirn aus einem harmonischen Partialtonspektrum eine in Wirklichkeit fehlende Grundschwingung zu bestimmen und zu hören. Beispielsweise erzeugt ein Fagott die 110 Hertz des Tons A gar nicht, sondern lediglich die Frequenzen von a[1], cis[2] und e[2] mit 440, 550 beziehungsweise 660 Hertz – das A entsteht nämlich als Differenzton bei der Verarbeitung des Gehörten.

Bild 8: Auch der Karplus-Strong-Algorithmus einer gezupften Gitarrensaite nutzt eine Verzögerungseinheit. Indem das Ausgangssignal *x* rückgekoppelt und dabei mit Filterfunktionen *f* zum neuen Eingangssignal *y* geschwächt wird, ergibt sich bei *n* Iterationen ein exponentiell abklingender Ton. Zur Anregung dient ein kurzer Puls.

Manche Frequenzen maskieren andere. Beispielsweise werden niedrige besser wahrgenommen als höhere und können also diese schon bei vergleichsweise geringen Pegeln überdecken. Es gibt Effektgeräte, die unter der Bezeichnung Psychoakustik-Prozessoren das Ergebnis eines Klangerzeugers dementsprechend nochmals bearbeiten. Zudem machen sich Verfahren zur Verdichtung von Audiodaten diesen Umstand zunutze, indem sie verdeckte Frequenzen aus dem Datensatz eliminieren.

Bislang war stets die Rede von einem Klangerzeuger. Musik beinhaltet aber meist ein Zusammenspiel verschiedener Instrumente, deren Frequenzen ein gemeinsames Spektrum des Klangkörpers bilden (Komponisten insbesondere des 20. Jahrhunderts nutzten die Orchesterzusammenstellung intensiv zur Klangfarbensteuerung). Sogenannte Mittenfrequenzen sind allen Instrumenten gemeinsam; sie häufen sich beim Zusammenspiel mehrerer Instrumente und werden dann als unangenehm empfunden. Deshalb sollten reine Begleitklänge einen möglichst geringen und zudem deutlich unterscheidbaren Frequenzumfang haben, während ein Soloinstrument sozusagen aus dem Vollen schöpfen darf, um im Vordergrund zu stehen.

So bewegt sich die Entwicklung digitaler Klangerzeuger auf der Nahtstelle zwischen Computertechnik, Musikwissenschaft und Psychoakustik. Letztlich profitieren Musiker, Zuhörer und Musikindustrie von den Fortschritten in diesen drei Bereichen.

Thoralf Abgarjan studierte Physik an der Universität Halle-Wittenberg und promovierte dort 1995. Er ist Produktmanager für elektronische Instrumente

Steuerung von Musik-Hardware mit MIDI

Ende der siebziger Jahre war abzusehen, daß mehr und mehr Mikroprozessoren in elektronischen Instrumenten Verwendung finden würden. Die bis dahin gültige Norm für die Steuerspannung von Synthesizern und Klangmodulen – ein Volt entsprach einer Tonänderung um eine Oktave – reichte nicht mehr aus. In den Jahren 1982 und 1983 wurde deshalb ein systemübergreifender Kommunikationsstandard für digitale Musikinstrumente vereinbart: das *musical instruments digital interface*, kurz MIDI. Es umfaßt zunächst als Hardware eine unidirektionale serielle Datenleitung, das heißt eine Verbindung, auf der Bit für Bit transferiert wird; die Übertragungsrate beträgt 31,25 Kilobyte pro Sekunde. Des weiteren enthält die Spezifikation die zu transportierenden Datentypen, sogenannte Events, insbesondere Anweisungen an Tonerzeuger, Steuerungsbefehle für Klangparameter wie die Lautstärke sowie Hüllkurvenparameter oder Filter.

Ein Ton muß per Note-On-Befehl aktiviert und mit einem Note-Off-Befehl wieder gestoppt werden. Jedes MIDI-Event erfordert mehrere Angaben, so beispielsweise eine Kanalnummer, auf der ein Klangerzeuger angesprochen werden soll, sowie die auf eine Klaviatur bezogene Nummer der Note und ihre Anschlagstärke. (Sogenannte Pitch-Bend-Kontrollbefehle ermöglichen den nahtlosen Übergang zwischen zwei Tönen; diesen Befehl nutzt man auch, um das Spielen ohne Klaviatur und somit ohne fixen Tonvorrat mit MIDI zu ermöglichen.) Weil die Kanaladresse in vier Bit verschlüsselt ist, kann man zugleich 16 unterschiedliche Klänge eines oder mehrerer MIDI-Instrumente ansprechen. Ein Event benötigt maximal drei Byte. Eine Ausnahme davon sind sogenannte systemexklusive MIDI-Events ohne festgelegte Länge und Kanal. Sie übertragen im wesentlichen gerätespezifische Informationen wie Klangprogramme, Effekteinstellungen oder abzuspielende Samples.

Da MIDI eine serielle Datenübertragung ist, gibt es keine Gleichzeitigkeit der Ereignisse. Zwei auf einem Keyboard gemeinsam angeschlagene Noten lösen Töne bis zu eine Millisekunde nacheinander aus – ein Akkord wird also immer arpeggiert. Weil das menschliche Ohr Schallereignisse im Abstand von durchschnittlich zehn bis zwanzig Millisekunden aufzulösen vermag, kann dies bei vielstimmigen Akkorden kritisch werden.

Hard- und Softwaresysteme zum Steuern von Musikinstrumenten sowie zur Aufnahme, Bearbeitung und Wiedergabe der Befehle bezeichnet man als Sequenzer. Der Name rührt daher, daß sie Tonbandmaschinen nachempfunden sind und Informationen deshalb auf Spuren und in Sequenzen ablegen. Der entscheidende Unterschied zu konventionellen Mehrspur-Aufnahmesystemen ist die komfortable Möglichkeit zur Nachbearbeitung der Musik, beispielsweise zum Schneiden, Kopieren und Verschieben ohne Qualitätsverlust.

Mittlerweile kann man mit hochwertigen Sequenzern auch Audiodateien als synchronisierte Samples einbinden, bearbeiten und sogar mitunter in MIDI-Daten umsetzen. Dabei wird die Tonhöhe aus dem Frequenzspektrum bestimmt und die zeitliche Position aus den Peaks auf der Zeitachse. Für vergleichsweise einfaches Audiomaterial wie monophone Gitarrenpassagen ist das Verfahren bereits hinreichend geeignet; Melodien oder musikalische Motive ließen sich so eingeben. Ein Sequenzer kann MIDI-Daten meist auch als herkömmliche Notation darstellen (wie Notationsprogramme im allgemeinen umgekehrt musikalische Zeichen in Events konvertieren können). Vor allem aber lassen sich mit dieser Technik Grooves genannte Muster gewinnen: Aus der Aufnahme einer Schlagzeugpassage wird damit eine MIDI-Sequenz erzeugt; sie enthält die leichten, unregelmäßigen Abweichungen der Noten vom mathematisch korrekten Zeitmaß, die der Musik einen dynamischen und eigenwilligen Charakter geben – den Groove (Bild). Auch die Dynamik läßt sich ermitteln. Diese Muster kann man nun nicht nur wieder für Perkussionsinstrumente verwenden, sondern auch anderen synthetischen Klängen unterlegen, um einem Arrangement Lebendigkeit zu verleihen.

Anspruchsvolle Sequenzer ermöglichen, Audio- in MIDI-Daten umzuwandeln, etwa um sogenannte Grooves zu gewinnen.

von Yamaha Europa. **Klaus-Dieter Linsmeier** ist Mitglied der Redaktion.

Literaturhinweise

The Synthesis of Complex Audio Spectra by Means of Frequency Modulation. Von John M. Chowning in: Journal of the Audio Engineering Society, Band 21, Heft 7, Seiten 526 bis 534, 1973.

Digital Synthesis of Plucked String and Drum Timbres. Von K. Karplus und A. Strong in: Computer Music Journal, Band 7, Heft 2, Seiten 43 bis 55, MIT Press, 1983.

Klang: Musik mit den Ohren der Physik. Von John R. Pierce. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 1985.

Die Physik der Musikinstrumente. Spektrum der Wissenschaft: Verständliche Forschung. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 1988.

The Physics of Musical Instruments. Von N. H. Fletcher und T. D. Rossing. Springer, New York 1991.

The Historical CD of Digital Sound Synthesis. Computer Music Currents 13. Herausgegeben von Johannes Goebel, Schott Wergo Music Media, Mainz, 1995.

Dreams of Computer Music – Then and Now. Von F. Richard Moore in: Computer Music Journal, Band 20, Heft 1, Seiten 25 bis 41, MIT Press, 1996.

Physical Modeling Synthesis Update. Von Julius O. Smith III in: Computer Music Journal, Band 20, Heft 2, Seiten 44 bis 56, MIT Press, 1996.

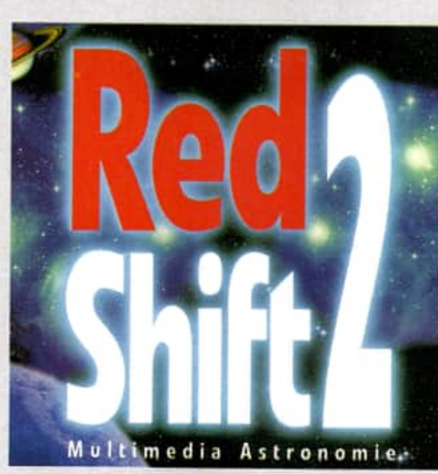
Bitte beachten Sie auch die Anzeige auf Seite 79.

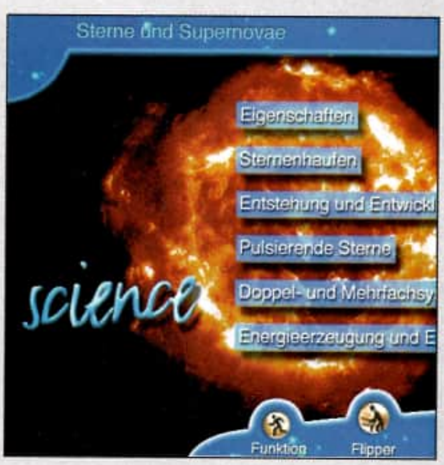














CD-ROM-Highlights

Streifzüge durch die Musikgeschichte, 1996 ausgezeichnet mit dem Emma Award, führt Sie durch die sechs Epochen der Kammermusik. Studieren Sie anschaulich animierte Partituranalysen zu 29 berühmten Werken, machen Sie die Bekanntschaft der 22 bekanntesten Komponisten, lernen Sie 15 Instrumente kennen, und erleben Sie deren spezifische Rolle im Werk; **DM 59,–** bis 30. November 1997, danach DM 69,– zzgl. Versand. Hybridversion: ab Win 3.1, PC 486/40, 8 MB RAM; MAC ab 68040, System 7.1, 8 MB RAM.

Edison – der Zauberer von Menlo Park bringt Ihnen Leben und Zeit dieses großen Erfinders wieder und führt Ihnen 13 seiner bekanntesten Erfindungen im Detail vor. Eine interaktive Zeittafel stellt Edisons Erfindungen Ereignissen der Weltgeschichte gegenüber. Die CD richtet sich an junge Leser und enthält ein Morse-Spiel zur Verschlüsselung von Nachrichten und ein lehrreiches Fragespiel; **DM 89,–** bis 30. November 1997, danach DM 99,– zzgl. Versand. Hybridversion: ab Win 3.1, PC 486 DX, 8 MB RAM; MAC ab 68040, System 7.1, 8 MB RAM.

Mit der CD **Ozean – Ursprung des Lebens** entdecken Sie die Entstehung des Lebens im Wasser. Ausgefeilte Computergrafik und 3D-Animationen lassen längst ausgestorbene Spezies wieder auferstehen und ihre Bewegungen und Verhaltensweisen nochmal erleben; **DM 99,–** zzgl. Versand. System: Pentium, mind. 8 MB RAM, WIN 95, 32000 Farben, 4fach CD-ROM-Laufwerk, 16 bit Soundkarte.

Reisen Sie mit **Red Shift 2** durch Raum und Zeit bis an den Rand unseres Universums. Aufgrund aktuellster Daten werden Konstellationen und Animationen Ihrer Reisen genau berechnet. Neben dem virtuellen Observatorium beinhaltet die CD-ROM Simulationen von Weltraumflügen; **DM 149,–** zzgl. Versand. Hybridversion: ab Win 3.1, 80386 Prozessor, 33 MHZ, 8 MB RAM; MAC ab 68020, System MacOs, 8 MB RAM.

AHA! – Der Mensch. Die für den Emma Award nominierte CD-ROM präsentiert Edutainment im besten Sinne: Während in der Abteilung Science Grundwissen über unseren Körper vermittelt wird, präsentiert der AHA!-Teil Überraschendes und Alltägliches auf unterhaltsame Weise mit zahlreichen Interaktionen; **DM 79,–** zzgl. Versand. System: Pentium, Win 95, Soundblaster, 8 MB RAM.

AHA! – Der Kosmos. Themen aus dem Inhalt: Sonne · Kometen · erdähnliche Planeten · Monde · Urknall · Galaxien · Milchstraße · Schwarze Löcher; **DM 79,–** zzgl. Versand. System: Pentium, Win 95, Soundblaster, 8 MB RAM.

Weitere CD-ROM-Angebote finden Sie auf unserer Bestellkarte auf den Seiten 19/20.



Asbest: Aufstieg und Fall eines Wunderwerkstoffs

Seit mehr als 2000 Jahren nutzt die Menschheit die einzigartigen Eigenschaften des faserartigen Silicatminerals. Auf seine Glorifizierung Anfang des Jahrhunderts folgte vor 20 Jahren die ebenso überzogene Verdammung.

Von James E. Alleman und Brooke T. Mossman

Die Zukunft von Asbest als Werkstoff scheint ausgesprochen düster. Nach zwei Jahrzehnten mit immer neuen Schreckensmeldungen gilt das faserige Mineral heute als einer der gefährlichsten Schadstoffe überhaupt. Mit Sicherheit aber ist es derjenige, dessen Erfassung und Entsorgung weltweit die meisten Kosten verursacht. Allein in diesem Jahr werden Maßnahmen zu seiner Beseitigung mehrere Milliarden Dollar verschlingen – gewaltige Ausgaben selbst in einer Zeit, da man mit Geld für den Umweltschutz nicht geizt. Ironischerweise hätte das Problem niemals dieses Ausmaß erreicht, wäre das Material seiner einzigartigen Kombination nützlicher Eigenschaften wegen nicht einst ebenso glorifiziert worden, wie man es nun verdammt.

Asbest ist die Sammelbezeichnung für eine Gruppe von Silicatmineralen, also Verbindungen von Silicium und Sauerstoff, mit faserartiger Struktur (siehe Kasten auf Seite 89). Wegen seiner Weichheit und Flexibilität galt der feuerfeste Naturstoff einst als Seide des Mineralreiches. Jahrhundertelang sind Mäntel, Tischtücher, Theatervorhänge und Anzüge zum Schutz vor Brandgefahren daraus gewebt worden. Isoliermaterialien aus Asbest halfen nicht nur Energie sparen, sondern schirmten Arbeiter auch gegen die Hitze von Hochöfen oder anderen Wärmequellen ab. Daraus gefertigte Bremsbacken und Kupplungsbeläge erhöhten die Fahrtüchtigkeit von Kraftfahrzeugen; Luftfilter aus Asbest wurden in Ventilatoren von Krankenhäusern, Zigarrettenfiltern und Gasmasken für Soldaten verwendet. Paradoxerweise diente das mittlerweile als Schadstoff verrufene Material also einst der Sicherheit und Gesundheit des Menschen.

Erste Erwähnungen und Anwendungen

Berichte über Asbest finden sich schon bei antiken Philosophen und Naturforschern. Wohl als erster erwähnt ihn Theophrast (372/369 bis 288/285 vor Christus), ein Schüler des Aristoteles (384 bis 322 vor Christus), in seinem

Das Auf und Ab im Ansehen des Asbests

Erstmals erwähnt wurde Asbest in dem Buch „Über Steine“ des Aristoteles-Schülers Theophrast. Dort ist von einer Substanz die Rede, die verfaultem Holz ähnelt und nach dem Tränken mit Öl brennt, ohne sich zu verändern.

In seiner medizinischen Abhandlung „De Materia Medica“ beschrieb der griechische Arzt Pedanios Dioskorides im 1. Jahrhundert nach Christus wiederverwendbare Taschentücher aus Asbest, die im Feuer gereinigt und gebleicht werden konnten.

Plinius der Ältere benutzte in seiner „Naturgeschichte“ erstmals die Bezeichnung Asbest.

300 Jahre vor Christi Geburt

50 Jahre nach Christi Geburt

klassischen Werk „Über Steine", das er um 300 vor Christus verfaßte. Er beschrieb darin eine unbenannte Substanz, die faulem Holz ähnele und, mit Öl getränkt, ohne sichtbare Veränderungen brenne. Während der nächsten vier Jahrhunderte steuerten viele griechische und römische Gelehrte nach und nach weitere Erkenntnisse über dieses ungewöhnliche Gestein und die wachsende Vielfalt seiner Anwendungen bei. Im 1. Jahrhundert nach Christus stieß der Geograph Strabo (64/63 vor bis nach 23 nach Christus) auf der Insel Évvoia auf den ersten griechischen Asbeststeinbruch; wie er berichtete, wurden dort Mineralfasern abgebaut, gekämmt und wie Wolle zu Fäden versponnen, die als Ausgangsmaterial für ein Sortiment feuerfester Kleidungsstücke dienten.

Der griechische Arzt Pedanios Dioskorides (um 15 bis 85 nach Christus, im deutschen Sprachraum meist Pedanius Dioskurides genannt) erwähnte in seinem Werk „De Materia Medica" wiederverwendbare Taschentücher aus Asbest, die an Theaterbesucher verkauft und anschließend im Feuer gereinigt und gebleicht wurden. Außerdem beschrieb er eine Asbestmine auf dem Berg Olymp auf Zypern und gab dem Mineral erstmals einen Namen: *amiantos*, was unbefleckt oder vollkommen bedeutet. Mindestens drei andere Autoren, darunter der griechische Historiker Plutarch (46/47 bis 120 nach Christus), wiesen darauf hin, daß die Dochte der Lampen, in denen auf der Akropolis das ewige Feuer brannte, aus Asbest bestanden.

Plinius der Ältere (23 bis 79 nach Christus) lieferte in seiner „Naturgeschichte" eine der umfassendsten Beschreibungen des Gesteins, die aus dem Altertum bekannt sind. Der römische Schriftsteller benutzte auch erstmals die griechische Bezeichnung *asbestos*, was unauslöschlich oder unvergänglich bedeutet. Seinem Bericht zufolge wurde das Mineral für unterschiedliche Textilien verwendet – von leicht zu reinigenden Tischtüchern und Servietten bis zu wiederverwendbaren Leichentüchern für die Feuerbestattung verstorbener Mitglieder des Königshauses.

Auch in den nächsten 1000 Jahren erfreute sich Asbest von Westeuropa bis China der besonderen Gunst von Herrschern und Naturforschern. Karl der Große (747 bis 814) etwa soll einer populären Legende zufolge ein daraus gefertigtes ölgetränktes Tischtuch angezündet haben, um seine Tafelgäste zu verblüffen. Sogar der Vatikan schätzte offenbar Totenkleider aus dem unvergänglichen Stoff – in einem römischen Sarkophag aus dem Mittelalter wurde kürzlich eines entdeckt. Im Laufe der Zeit scheint allerdings in Vergessenheit geraten zu sein, daß es sich bei dem Material um ein Gestein handelt.

So wurden für die Herkunft der außergewöhnlichen Fasern im Mittelalter ausgesprochen phantasievolle Erklärungen gegeben. Die Alchemisten sahen darin das Haar von angeblich feuerfesten Salamandern, was dem Mineral zu einem weiteren Namen verhalf: Salamandra. In alchemistischen Werken wird oft der Mythos eines von Flammen umgebenen omnipotenten Salamanders beschworen. Im frühen 16. Jahrhundert übernahm König Franz I. von Frankreich dieses Symbol als Emblem für Flaggen, Münzen und Einfassungen von Kaminen.

Teils wurde auch behauptet, Asbest stamme vom Kamm des Basilisken, eines Fabelmischwesens aus Schlange, Drachen und Hahn mit lähmendem Blick, oder von Federn des mythischen Feuervogels Phönix, der sich in bestimmten Zeitabständen selbst verbrennt und unversehrt wieder aus der Asche ersteht. Versuche, das Mineral genauer zu charakterisieren, zeugten eine verwirrende Namensvielfalt: Mehrere Dutzend Bezeichnungen wurden den unterschiedlichen Asbestarten verliehen – unter anderen „Bergleder", „unbrennbares Leinen", „Steinwolle" und „Faser-Alaun".

Durch einen glücklichen Zufall brachte Marco Polo (1254 bis 1324) den Asbest in das Reich der Wissenschaft zurück. In seinem Tagebuch beschrieb der venezianische Forschungsreisende den Besuch einer chinesischen Asbestmine im späten 13. Jahrhundert. Damit widerlegte er die Salamandertheorie und machte endgültig klar, daß das Material ein Gestein ist. Georgius Agricola (1494 bis 1555), einer der Begründer der Mineralogie und Geologie, trug entscheidend zum wissenschaftlichen Verständnis des Asbest bei. In seinem Lehrbuch „De natura fossilium" (1546) referierte und wertete er in aller Breite, was an Informationen über das Material vorlag, und fügte neueste Erkenntnisse über unterschiedliche Formen, Quellen und Verwendungen an. Erstmals unterzog er die Substanz auch einer Geschmacksprüfung und warnte, daß sie „auf der Zunge ein wenig stechen" könne.

Von der Kuriosität zum kommerziellen Produkt

Den Mitgliedern der 1660 gegründeten Royal Society in London hatte es der Asbest gleichfalls angetan. In den Berichten der Gesellschaft aus den ersten 40 Jahren finden sich acht Übersichtsar-



Jungfräuliche Vestalinnen bewachten die ewige Flamme am Schrein der Vesta, der römischen Göttin des Herdfeuers; der Lampendocht bestand aus Asbest.

Um 800 soll Karl der Große, um seine Tafelgäste zu beeindrucken, ein Tischtuch aus Asbest ins Feuer geworfen und unversehrt wieder herausgezogen haben.

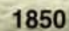


Alchemisten im Mittelalter hielten Asbestfasern für Haare von Salamandern, die angeblich jedem Feuer widerstünden.

Marco Polo besuchte in der zweiten Hälfte des 13. Jahrhunderts eine Asbestmine in China und schloß daraus, daß Asbest ein Gestein sei.

100 Jahre nach Christi Geburt

1000 Jahre nach Christi Geburt



1850

1828: Erstes bekanntes US-Patent für Asbest, erteilt für ein Isoliermaterial in Dampfmaschinen

1834: Britisches Patent auf die Verwendung von Asbest in Geldschränken

1853: Britisches Patent auf die Verwendung von Asbest in Schmiermitteln für Achslager

ASBESTOS ROOFING

Dachpappe aus Asbest

1859: Britisches Patent für mit Asbest ausgekleidete Brennkammern

1865: Britisches Patent für Asbestisolierungen von Elektrodrähten

1868: US-Patent für Dachpappe aus Asbest

1820

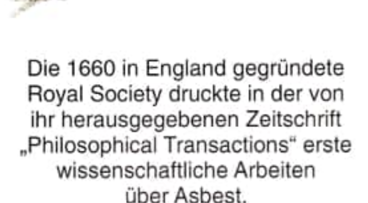


Verwendung von Asbest als Isoliermaterial für Dampfmaschinen

Im frühen 19. Jahrhundert kamen in Europa feuerfeste Schutzanzüge und Theatervorhänge in Gebrauch.

1800

Benjamin Franklin brachte 1724 eine Brieftasche aus Asbest nach England mit.



Die 1660 in England gegründete Royal Society druckte in der von ihr herausgegebenen Zeitschrift „Philosophical Transactions" erste wissenschaftliche Arbeiten über Asbest.

In seinem Lehrbuch „De natura fossilium" von 1546 verbreitete sich Georgius Agricola über die Eigenschaften von Asbest und berichtete von Vorkommen in Griechenland, Indien und Ägypten.

1500

tikel und Kurzmitteilungen darüber. Der deutsche Arzt und Naturforscher Franz Ernst Brückmann (1697 bis nach 1749) widmete ihm 1727 die erste Monographie; Bücher über Asbest schrieben wenig später auch Martin Frobenius Ledermüller (1719 bis 1769), einer der Pioniere der Naturbetrachtung mit dem Mikroskop, und der schwedische Chemiker und Mineraloge Torbern Olof Bergman (1735 bis 1784). Ledermüller stellte in seiner bahnbrechenden Abhandlung alle bekannten Arten mineralischer Fasern detailliert mit farbigen Gravuren dar.

Mit jeder neuen Veröffentlichung erweiterte sich das Spektrum kommerzieller Anwendungen. Zur Palette der Kleidungsstücke kamen feuerfeste Mäntel und Hemden sowie Fransen für Ärmel und Kragen; auch erwog man ein unzerstörbares „Buch für die Ewigkeit" aus güldenen Lettern auf Asbestpapier. Der amerikanische Politiker und Erfinder Benjamin Franklin (1706 bis 1790) verwahrte als Jugendlicher seine Barschaft in einer Börse aus gewebtem Asbest – angeblich in der Hoffnung, daß ihm der Inhalt nicht das sprichwörtliche Loch in die Hosentasche brennen würde. Auf seiner ersten Reise nach England verkaufte er den ungewöhnlichen Geldbeutel 1724 an Sir Hans Sloane (1660 bis 1753), dessen ausgedehnte Sammlung nach seinem Tode den Grundstock des Britischen Museums bildete (heute befindet sich die Kuriosität im Naturhistorischen Museum in London).

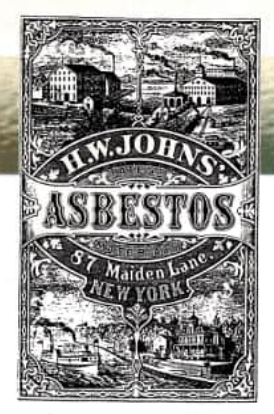
Im späten 18. und frühen 19. Jahrhundert diente Asbest Beutelschneidern und Gauklern als lukrative Einnahmequelle. Die erfolgreichsten und skrupellosesten Betrüger drehten leichtgläubigen religiösen Kunden Gegenstände aus der Mineralfaser als wundersame, feuerfeste Relikte von Christi Gewand und Kreuz oder andere Reliquien an. Bei einer harmloseren Variante verwendeten fahrende Artisten isolierende, unbrennbare Handschuhe und Umhänge aus Asbest, um das Publikum mit allerlei Feuerzauber zu verblüffen; so waren die „Menschlichen Salamander", wie sich die Mitglieder einer Truppe nannten, dafür berühmt, inmitten eines Scheiterhaufens ein Stück Fleisch in der Hand zu braten.

In den zwanziger Jahren des 19. Jahrhunderts machte der italienische Experimentalphysiker Giovanni Aldini (1834 gestorben) aus diesem Trick das erste wirklich erfolgreiche seriöse Geschäft mit Asbest. Seine konfektionierte Brandschutzkleidung speziell für Feuerwehrleute wurde begeistert aufgenommen und fand schnell Abnehmer bis nach Genf und Paris. Kurz danach kamen die ersten Bühnenvorhänge aus der Mineralfaser auf, die bei Theaterbränden viele Menschenleben gerettet haben sollen.

Doch erst die Dampfmaschine brachte Asbest in den Ruf eines Supermaterials. Um sie in puncto Sicherheit und Wirkungsgrad weiter zu verbessern, brauchte man auch andere Werkstoffe als Metall, die besser wärmedämmend, aber ebenso hitzebeständig waren. Asbest erwies sich als ideal für Kesselisolierungen; für stetig beanspruchte, insbesondere bewegliche Teile war er zwar zu grob und zu wenig abriebfest; aber durch Mischen mit Gummi erhielt man ein dauerhaftes, elastisches Material etwa für Dichtungen und Manschetten.

Um 1860 erreichte Asbest auch den häuslichen Bereich. Nachdem der junge New Yorker Bauunternehmer Henry Ward Johns halb spielerisch mit feuerfesten Farbmischungen experimentiert hatte, entwickelte er eine schwer entflammbare Dachpappe – ein Segen in einer Zeit häufiger Gebäudebrände. Die sandwichartig aufgebaute Folie aus Sackleinwand, Manilapapier (aus Blattscheiden der Faserbanane gefertigt) und einer Teerschicht mit eingebetteten Asbestfasern begründete den bedeutenden Industriezweig der auf dem Mineral basierenden Verbundbaustoffe.

Im Jahre 1893 begann der österreichische Ingenieur Ludwig Hatschek, in einer stillgelegten Papierfabrik in Schön-



Werbung für Asbest zwischen 1870 und 1880



1884: Britisches Patent für Fertigbauteile aus Asbest

1885: Britisches Patent für Asbestmembranen zum Filtrieren von Fruchtsäften und anderen Flüssigkeiten



Das Kapitol des US-Staates Indiana wurde 1894 in einer Werbebroschüre für Asbest mit dem Titel „Hitzeisolierung und Brandschutz in wichtigen Gebäuden" als Beispiel aufgeführt.

Was ist Asbest?

Asbest ist die Sammelbezeichnung für verschiedene faserartig kristallisierende Silicate. Man unterscheidet zwei Hauptgruppen: den Amphibol- oder Hornblende- und den Chrysotil- oder Serpentin-Asbest. Zur ersten Gruppe gehören die fünf Minerale Aktinolith (Strahlstein), Amosit, Anthophyllith, Krokydolith und Tremolit. Alle Asbestminerale enthalten lange Ketten aus Silicium- (das teilweise durch Aluminium ersetzt ist) und Sauerstoffatomen, die jeweils paarweise über Sauerstoffbrücken zu Bändern verbunden sind. Diesem linearen Aufbau verdanken sie ihre faserartige Struktur. Die einzelnen Formen differieren im relativen Gehalt an Metallen wie Calcium, Magnesium oder Eisen, die als positiv geladene Kationen die negative Ladung des Silicatgerüstes kompensieren und gewisse Unterschiede in den physikalischen und chemischen Eigenschaften bedingen.

Gemeinsam ist allen Asbestmineralen, daß die Fasern nicht nur unbrennbar, hitzebeständig, wärmedämmend und weitgehend säureresistent, sondern auch fester als Stahldrähte gleichen Querschnitts und zugleich relativ elastisch sind. Diese einmalige Eigenschaftskombination macht das Material zum idealen Werkstoff für viele industrielle Anwendungen. Die faserige Beschaffenheit von Asbest ist aber auch für die gesundheitsschädlichen Wirkungen verantwortlich. Die feinen Fasern können als Schwebstoffe in die Luft gelangen und eingeatmet werden; sie setzen sich dann in der Lunge fest und verursachen eine fortwährende Reizung des Gewebes, durch die sich schließlich – meist erst nach vielen Jahren – Tumore bilden können.

Die Fasern der Amphibol-Minerale sind wesentlich fester und steifer als die des Chrysotils – und deswegen viel gefährlicher. Die beiden häufigsten Amphibole Amosit und Krokydolith (oft als brauner und blauer Asbest bezeichnet) kommen in abbauwürdigen Lagerstätten vor allem in Südafrika vor und wurden früher mit Zement zu dem bekannten Baustoff Eternit gemischt; inzwischen ist die Verwendung von Amphibol-Asbest jedoch in den meisten Ländern verboten. Die übrigen Amphibole – Anthophyllith, Tremolit und Aktinolith – hatten dagegen nie kommerzielle Bedeutung.

Wirtschaftlich am wichtigsten war stets der magnesiumreiche Chrysotil (auch grüner Asbest genannt); sein Anteil am weltweiten Asbestverbrauch betrug zeitweise mehr als 95 Prozent. In Struktur, Zusammensetzung und Eigenschaften unterscheidet er sich deutlich von den Amphibol-Mineralen. Es handelt sich um die faserige Form des Serpentins, von dem auch blättrige und schuppige Varianten vorkommen. Der schwedische Chemiker, Pharmazeut, Arzt und Mineraloge Johann Gottschalk Wallerius (1709 bis 1785) gab ihm in dem Buch „Mineralogia" (1750) seinen Namen, weil das vielfarbig geäderte oder geflammte Mineral, das in grünlichen, aber auch gelb- und rotbraunen bis schwärzlichen Tönen schillert, an Schlangenhaut erinnert (lateinisch *serpens* = Schlange). Chrysotil ist merklich weicher und flexibler als die anderen Asbestarten. Weil seine Fasern deshalb im Körper leichter brechen als die von Amphibol-Asbest, schädigen sie Bindegewebe nicht so stark.

Schätzungen zufolge sind noch ungefähr 20 Prozent der Gebäude in den Vereinigten Staaten mit Chrysotil-Asbest in Schindeln, Zementröhren, Isolierungen und anderen Bauteilen belastet. Asbest in gut erhaltenen Bauwerken gibt allerdings keineswegs spontan Fasern in die Luft ab; das geschieht nur bei Zerfall, Renovierung oder Abbruch. Des weiteren erwies sich bei den meisten Untersuchungen, daß der Asbestgehalt der Innenluft von Gebäuden deutlich unter den von den amerikanischen Gesundheitsbehörden an Arbeitsplätzen vorgeschriebenen Obergrenzen liegt; das gilt selbst dann, wenn an den asbesthaltigen Teilen Änderungen vorgenommen wurden.



Chrysotil



Krokydolith



Amosit

1900



Asbest-Allegorie aus einer Werbebroschüre des frühen 20. Jahrhunderts

Telephone und viele Haushaltsgeräte wurden aus Bakelit-Asbest-Mischungen hergestellt.

Einführung von Bremsbacken aus Asbest für Autos

1920

In England wurden 1931 als Reaktion auf Berichte von Lungenschäden durch Asbest, vor allem bei Arbeitern in der Textilindustrie, Vorschriften für den industriellen Umgang mit dem Werkstoff erlassen.

Der Asbest-Mann auf der Weltausstellung 1939 in New York

dorf Mischungen aus Asbest und Zement herzustellen und sie unter dem Namen Eternit (nach lateinisch *aeternus*, ewig, unvergänglich) als leichte, mechanisch sehr stabile Bauverkleidung zu vermarkten. Wegen des großen allgemeinen Interesses am Brandschutz wurde die Erfindung zu einem Sensationserfolg. Nachahmer entwickelten sehr bald ähnlich zusammengesetzte Produkte – unter anderem synthetischen Schiefer für Dachschindeln, gerippte Wand- und Dachverkleidungen und dekorative Wand- und Deckenformstücke.

Dutzende von Erzeugnissen, die in der ersten Hälfte dieses Jahrhunderts auf den Markt kamen, enthielten Asbest. Feuerfeste Schiffe hatten Rümpfe aus Eternit-Planken. Mischungen aus Bakelit und Asbest wurden für Knöpfe, Telephonapparate und Elektroschaltkästen verwendet. Überhaupt setzte die Kunststoffindustrie anfangs stark auf Kombinationen mit der Mineralfaser, weil diese das Syntheseprodukt verstärkte, seine Hitzebeständigkeit erhöhte und sein Gewicht verringerte. Auch nach der Entwicklung besserer Polymere blieb Asbest ein bedeutendes Bindemittel und Verstärkungsmaterial. So gehörten Fliesen aus Vinylasbest zu den meistverkauften Fußbodenbelägen. Bis heute kann man in Werkstätten überall in den USA asbesthaltige Bremsbeläge für Autos kaufen, weil viele Mechaniker glauben, daß es keinen gleichwertigen Ersatz gibt.

Auf dem Gipfel der Beliebtheit

Um 1939 hätte die öffentliche Meinung über Asbest kaum besser sein können. In diesem Jahr feierte die Firma Johns-Manville auf der Weltausstellung in New York stolz den „Dienst des Minerals an der Menschheit". Unter anderem ließ sie den Besuchern durch einen überlebensgroßen sprechenden „Asbestmann" den Weg zu ihrem Stand weisen und ihnen eine gründliche Belehrung über die außerordentlichen Fähigkeiten des Werkstoffs erteilen. Das Messegelände war von den Dachziegeln bis zu den unterirdischen Rohren buchstäblich mit Asbest durchsetzt.

Damals erreichte die Popularität der Mineralfaser solche Höhen, daß die Nachfrage die weltweite Abbaukapazität zu übersteigen drohte. Weil die militärischen Großmächte nicht über genügend heimische Ressourcen verfügten, befürchteten sie vor dem Ausbruch des Zweiten Weltkriegs eine kritische Abhängigkeit von Importen. Deutschland beschaffte heimlich ganze Schiffsladungen mit Asbest aus Südafrika, um einen ausreichenden Vorrat anzulegen. Einige Zeit argwöhnten die Alliierten, unter dem aufrüstenden nationalsozialistischen Regime sei ein chemischer Ersatzstoff entwickelt worden – eine Befürchtung, die der US-Geheimdienst CIA jedoch entkräften konnte.

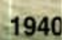
Zwar existierte zwischen den Vereinigten Staaten und der Sowjetunion ein Übereinkommen zur gegenseitigen Lieferung von Asbest im Bedarfsfall, das der amerikanische Geschäftsmann Armand Hammer (1898 bis 1990) bereits mit dem bolschewistischen Revolutionsführer Wladimir Iljitsch Lenin (1870 bis 1924) ausgehandelt hatte. Doch die US-Regierung hielt Einfuhren – noch dazu aus Übersee – für zu unsicher. Obwohl kanadische Bergbauunternehmen sich nach Kräften bemühten, die Nachfrage in den USA zu decken, wurde das Material dort nach Kriegsbeginn für nicht unbedingt notwendige zivile Anwendungen streng rationiert. Etliche hundert Tonnen verbrauchte die Armee jeden Tag für die verschiedensten Zwecke – von Schiffsmotoren über Bauteile von Jeeps, an Fallschirmen herabschwebende Leuchtbomben und Panzerfäuste bis hin zu Torpedos; selbst die Ärzte in den Feldlazaretten trugen leicht sterilisierbare Operationskleidung aus Asbest.

Die weltweite Hochkonjunktur in der Bauwirtschaft nach Kriegsende löste die nächste und wahrscheinlich letzte Nachfragewelle aus. Bauingenieure schätzten die mechanische Festigkeit, Haltbarkeit und Feuerbeständigkeit von Asbestzement-Produkten und setzten die Mischung großzügig ein. Wolkenkratzer konnten unter anderem nur deswegen in den Himmel wachsen, weil eine neuartige sprühbare Asbestversiegelung gewährleistete, daß sich die Stahlkonstruktionen bei eventuellen Bränden nicht verziehen.

Aufgrund der ungewöhnlichen Eigenschaften von Asbest entwickelte sich eine unvorstellbare Vielfalt von Anwendungen. Die Post der Vereinigten Staaten nutzte feuerfeste asbesthaltige Postsäcke. Fruchtsäfte, Weine und Rohzuckerlösungen wurden mit Asbestfiltern geklärt. Herzchirurgen verwendeten Asbestfäden, und in einer Zahnpasta diente Asbest als Poliermittel. Modelliertone enthielten das Material ebenso wie künstlicher Schnee. Selbst Hollywood verschaffte der Faser kurze Leinwandauftritte: In dem klassischen amerikanischen Märchenfilm „The Wizard of Oz" (1939) ist der brennende Stiel des Besens, auf dem die böse Hexe des Westens reitet, aus Asbest; dasselbe gilt für die künstlichen Spinnennetze in der Grabkammer des ägyptischen Prinzen, der in dem Horrorstreifen „Die Mumie" (1932) nach Jahrtausenden wieder zum Leben erwacht.

Wachsende Gesundheitsbedenken

Als die Umweltschutzbehörde der Vereinigten Staaten 1970 ihre Arbeit aufnahm, ging die Zahl kommerziell erhältlicher Asbestprodukte in die Tausende.

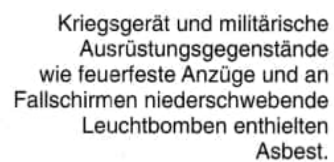




Die böse Hexe des Westens ritt 1939 im Spielfilm „The Wizard of Oz" auf einem Besen mit Asbeststiel.



Kriegsgerät und militärische Ausrüstungsgegenstände wie feuerfeste Anzüge und an Fallschirmen niederschwebende Leuchtbomben enthielten Asbest.



In Nachkriegsbauten wurde in großem Maßstab Asbest eingesetzt.



Bei weiterhin stetig steigender Nachfrage erreichte der Verbrauch 1973 in den USA schließlich die Rekordmarke von nahezu einer Million Tonnen. Doch dann kam der Umschwung.

Schon seit der Jahrhundertwende wußte man von Gesundheitsschäden bei Personen, die in Asbestmühlen und -verarbeitungsbetrieben sehr hohe Fasermengen einatmeten. Aufgrund von Berichten über eine als Asbestose bezeichnete Zerstörung des Lungengewebes, die bei britischen Arbeitern in staubigen Textilfabriken auftrat, wurden 1931 in Großbritannien Vorschriften für den industriellen Umgang mit Asbest erlassen. Dennoch interessierte sich die noch junge Arbeitsmedizin in den folgenden Jahrzehnten kaum für das Thema, obwohl bald auch ein bedenklicher Zusammenhang zwischen Asbest und Lungenkrebs, speziell bei Rauchern, aufgedeckt wurde.

Die Stimmung begann erst umzuschlagen, als sich Mitte der sechziger Jahre herausstellte, daß auch geringe Asbestmengen schon nachweisbare Gesundheitsrisiken bergen; demnach waren viel mehr Menschen als zuvor angenommen von asbestbedingtem Krebs bedroht – darunter zum Beispiel die Schiffsbauer aus dem Zweiten Weltkrieg. Wie etliche Untersuchungen weltweit ergaben, verursachten hauptsächlich die Amphibole – eine Untergruppe der Asbestminerale – die beobachteten Mesotheliome (Tumoren der Deckzellen, die Brust- und Bauchraum auskleiden). Angesichts dieser Erkenntnisse erließen die Regierungen der meisten Industrieländer Verordnungen zum Schutz vor Amphibolen. Unter zunehmendem Druck der Gewerkschaften und beeinflußt von ominösen Hochrechnungen, die mehr als eine Million Opfer prognostizierten, schloß die amerikanische Regierung dagegen sämtliche Asbestarten in die Schutzbestimmungen ein.

(In der Bundesrepublik Deutschland wurde 1979 zunächst die Verwendung von Spritzasbest untersagt; 1981 kam eine Vielzahl weiterer asbesthaltiger Produkte auf die Verbotsliste, die mit Inkrafttreten der Gefahrstoffverordnung 1986 noch einmal erweitert wurde. Gemäß einer Selbstverpflichtung der Asbestindustrie wird die Mineralfaser seit Ende 1990 nicht mehr im Hochbau eingesetzt. Im gleichen Jahr wurde Asbest – und zwar in all seinen Formen – im Rahmen einer Änderung der Gefahrstoffverordnung der Gruppe I der „sehr stark gefährdenden" krebserzeugenden Substanzen zugeordnet. Arbeiten an asbesthaltigen Materialien dürfen jetzt nur noch gemäß den Technischen Regeln für Gefahrstoffe 519 durchgeführt werden. Seit dem 1. November 1993 existiert ein allgemeines Verbot für die Herstellung und den Neueinsatz von Asbest, das nur wenige Ausnahmen zuläßt. *Die Redaktion*)

Obwohl die amerikanische Umweltschutzbehörde 1991 die generelle Ächtung aller Asbestsorten wieder aufgehoben hat, ist das politische und öffentliche Klima gegenüber dem Werkstoff in den USA nach wie vor von vehementer Ablehnung geprägt. Nur wenige Menschen können sich an die Glanzzeiten des Minerals erinnern, und noch weniger trauern ihm nach. Mögen frühere Generationen Asbest als wertvollen Rohstoff geschätzt haben – heute verdunkeln Besorgnisse über die Gesundheitsrisiken das einst strahlende Image.

Anhaltende Bedeutung

Es scheint tollkühn, Asbest Qualitäten zuzubilligen, die es teilweise rehabilitieren könnten. Und es als essentiellen Rohstoff von strategischer globaler Bedeutung einzustufen, wirkt vollends lächerlich. Genau so verhält es sich aber. Chrysotil beispielsweise – ein weicheres und weniger gefährliches Asbestmineral als Amphibol – ist für viele Schlüsseltechnologien immer noch unentbehrlich, und die US-Regierung hortet bis heute große Mengen davon.

Seine anhaltende Bedeutung zeigt sich besonders deutlich am Space-Shuttle: Dessen zwei Feststoffraketen enthalten asbestimprägniertes Gummifutter zum Schutz der Stahlummantelung vor den hohen Temperaturen beim Abbrennen des Treibstoffs in der Startphase. Tatsächlich hat die Verwendung von Asbest in der Luft- und Raumfahrt eine lange Tradition. Sie reicht bis ins späte 19. Jahrhundert zurück, als man einen feuerfesten Heißluftballon zu entwickeln versuchte. Die Nachbildung einer frühen Rakete, die gegen katastrophales Versagen der mechanischen Konstruktion mit Asbest beschichtet war, ist im Erdgeschoß des Luft- und Raumfahrtmuseums der Smithsonian-Institution in Washington zu besichtigen – ungeachtet des herrschenden Drucks, Asbest aus allen öffentlichen Gebäuden zu entfernen.

Auch die amerikanische U-Boot-Flotte benötigt Asbest: Um einsatzfähig zu sein, müssen die Boote über eigene Anlagen zur Produktion des lebenswichtigen Sauerstoffs verfügen; aus Asbest gewebte Matten sind eine Schlüsselkomponente der Elektrolysezellen an Bord, die Wasser in Sauerstoff und Wasserstoff zerlegen.

Selbst industrielle Anwendungen gibt es immer noch – mit Auswirkungen bis in allgemeine Lebensbereiche. So werden in den USA drei Viertel des zum Bleichen, Reinigen und Desinfizieren verwendeten Chlors industriell nach dem Diaphragma-Verfahren hergestellt, für dessen namensgebende flüssigkeitsdurchlässige Scheidewand sich bislang nur Asbest als Werkstoff eignet (in Europa beträgt der Anteil dieses Verfahrens

1970

Ergebnisse von Studien, wonach Asbest in niedrigen Konzentrationen gefährlicher ist als vermutet, weckten in den sechziger Jahren Gesundheitsbedenken in den USA.

Der Verbrauch von Asbest erreichte in den USA 1973 Rekordhöhe.



Asbest wurde im Zuge von aufwendigen Sanierungsmaßnahmen in großem Stil aus Schulen, Wohnhäusern und öffentlichen Gebäuden entfernt.

1980



Die Feststoffraketen der amerikanischen Raumfähre sind mit einer Asbest-Isolierung ausgekleidet – eine der wenigen verbliebenen Anwendungen des Minerals.

1990

an der Chlorproduktion allerdings lediglich 24 und im weltweiten Durchschnitt 43 Prozent). Mithin besteht eine nicht geringe Wahrscheinlichkeit, daß das elementarste Lebensmittel – Trinkwasser – mit Chlor aus dem Diaphragma-Verfahren entkeimt und auf dem Weg zu den Haushalten durch Asbestzementrohre gepumpt worden ist. Solche Rohre wurden in allen 50 US-Bundesstaaten seit 1930 verlegt; ihre Gesamtlänge würde für eine Pipeline reichen, die einmal zum Mond und zurück führt und dann noch achtmal die Erde umrundet.

Eine rationale Perpektive

Zugegebenermaßen benötigen all die noch existierenden Anwendungen (die zudem hauptsächlich auf dem weniger gefährlichen Chrysotil beruhen) keine großen Asbestmengen. Entsprechend ist der Verbrauch der Mineralfasern in den USA seit 1973 um 95 Prozent zurückgegangen. In vielen anderen Ländern aber gilt Chrysotilasbest nach wie vor als wichtiger Rohstoff. Weltweit dürften in diesem Jahr mehr als zwei Millionen Tonnen verarbeitet werden – hauptsächlich zu Baustoffen aus Asbestzement, die im asiatischen und osteuropäischen Raum sowie in Entwicklungsländern zum Einsatz kommen.

Angesichts des Gesundheitsrisikos wird Asbest wohl kaum seine einstige Bedeutung wiedererlangen; andererseits aber könnten sich so manche Ausmerzungskampagnen im nachhinein als überzogen und sachlich unbegründet erweisen. Die projizierten Todesraten durch Kontakt mit Asbestfasern innerhalb von Gebäuden und im Freien sind minimal im Vergleich zu denen durch Rauchen, Drogenmißbrauch und übermäßigen Alkoholgenuß. Weithin propagierte, emotional aufgeladene Slogans wie „Schon eine Faser kann töten“ überschreiten die Grenzen gesicherter wissenschaftlicher Erkenntnis, und dadurch ausgelöste Sanierungsmaßnahmen in Schulen und anderen Gebäuden waren nur allzuoft von zweifelhaftem Nutzen.

Im Bemühen, die Asbest-Debatte in rationale Bahnen zu lenken, beauftragten 1988 die amerikanische Umweltschutzbehörde, der Kongreß und einige betroffene private Institutionen gemeinsam das angesehene, gemeinnützige Health Effects Institute in Cambridge (Massachusetts) mit einer unabhängigen Bewertung des Problems. Der Bericht räumte mit einigen weitverbreiteten Mißverständnissen auf und stellte die wirtschaftlichen Konsequenzen einer radikalen Beseitigung aller asbesthaltigen Materialien dem fragwürdigen vorbeugenden Effekt dieser Maßnahme gegenüber. Zu einer ähnlichen Bewertung kam ein zweiter Report, den die amerikanische Ärztevereinigung (American Medical Association) 1991 publizierte. Beide Dokumente betonen, daß die heutige Kontamination gegenüber den einstigen Arbeitsplatzkonzentrationen, die Lungenschäden verursachten, extrem niedrig ist.

Über die künftige Verwendung des Materials könnte außer Sicherheitsaspekten aber auch die Versorgung entscheiden. Die griechischen Asbestminen waren schon im Altertum erschöpft, und die gegenwärtig bekannten Vorkommen gehen gleichfalls zur Neige. So wird sich das Asbestproblem möglicherweise von selbst erledigen. Dieses Ende des „unvergänglichen“ Werkstoffs wäre um so bedauerlicher, als für das Mineral mit seiner ungewöhnlichen Kombination von Eigenschaften bisher kein perfekter Ersatz gefunden wurde, obwohl Chemiker schon lange intensiv danach suchen.

James E. Alleman und **Brooke T. Mossman** forschen über unterschiedliche Aspekte von Asbest. Alleman ist Professor für Bauingenieurwesen an der Purdue-Universität in West Lafayette (Indiana). Er interessiert sich für praktische Anwendungen und die Geschichte des Minerals. Mossman ist Professor am Medizinischen College der Universität von Vermont in Burlington und untersucht vor allem die gesundheitlichen Auswirkungen von Asbest.

Literaturhinweise

Asbestos: Scientific Developments and Implications for Public Policy. Von B. T. Mossman, J. Bignon, M. Corn, A. Seaton und J. B. L. Gee in: Science, Band 247, Seiten 294 bis 300; 19. Januar 1990.

Asbestos: A Chronology of Its Origins and Health Effects. Von R. Murray in: British Journal of Industrial Medicine, Band 47, Heft 6, Seiten 361 bis 365; Juni 1990.

The Schoolroom Asbestos Abatement Program: A Public Policy Debacle. Von M. Ross in: Environmental Geology, Band 26, Heft 3, Seiten 182 bis 188; Oktober 1995.

Die Geheimakte Lew Landau

Der geniale sowjetische Physiker galt bisher als unpolitischer Gelehrter, der die Repressalien der Stalin-Ära passiv erduldet habe. Doch aus neuerdings zugänglichen Dokumenten der Geheimpolizei geht hervor, daß er in einem Manifest zum Sturz Stalins aufrief und nur knapp einem Ende in Straflagern entging.

Von Gennady Gorelik

Lew Davidowitsch Landau hat die mathematische Physik des 20. Jahrhunderts mitgeprägt. Seine Theorien beschreiben Phänomene der Tieftemperaturphysik wie Superfluidität und Supraleitung sowie verschiedene Aspekte der Elementarteilchenphysik und vieler anderer Disziplinen; für seine Erklärung der Superfluidität von Helium erhielt er 1962 den Nobelpreis.

Bis heute gehören Landau-Niveaus, Landau-Diamagnetismus, Landau-Spektrum und Landau-Ginsburg-Theorie zum Rüstzeug theoretischer Physiker. Seine Schriften haben Generationen von Wissenschaftlern geprägt (siehe Kasten auf Seite 98). Die Bibliothek der Harvard-Universität in Cambridge (Massachusetts) birgt viermal so viele Titel aus seiner Feder wie aus der des – ähnlich originellen und schulbildenden – amerikanischen Physikers Richard Feynman (1918 bis 1988; Nobelpreis 1965).

Seinen Bewunderern galt Landau als typischer Fall des weltfremden Gelehrten – kühn, respektlos und charmant, aber zugleich gänzlich unberührt von den Niederungen des Alltags. Dabei ignorierten sie zwei politisch brisante Aspekte seiner Biographie: ein Jahr Gefängnis gegen Ende der dreißiger Jahre sowie den Beitrag zur Entwicklung der sowjetischen Atombombe ein Jahrzehnt später.

Erst heute wissen wir, daß Landau ein durchaus politischer Mensch war und dem KGB sein Leben lang zutiefst verdächtig blieb. (Mit KGB – abgekürzt für russisch Komitee für Staatssicherheit – ist hier und im folgenden der für das Aufspüren sogenannter Saboteure zuständige Zweig der sowjetischen Geheimpolizei gemeint; strenggenommen ging der KGB erst 1954 aus dem Ministerium für Staatssicherheit MGB sowie der staatlichen politischen Verwaltung GPU hervor.)

Diese Entdeckung ist teilweise dem Zufall zu verdanken. Im Jahre 1989 veröffentlichte Maja Besserab, die Nichte von Landaus Ehefrau, die vierte Auflage ihrer Biographie des großen Wissenschaftlers. Im Zeichen der vom sowjetischen Premier Michail Gorbatschow kurz zuvor propagierten Glasnost (Offenheit) behauptete die Autorin, nun endlich könne sie die ganze Wahrheit über Landaus Verhaftung von 1938 erzählen: Ein verärgerter früherer Student namens Leonid Pjatigorskij habe Landau seinerzeit als deutschen Spion denunziert – und dies in der Ära der sogenannten großen Säuberungen, als unter Stalin (eigentlich Josef Wissarionowitsch Dschugaschwili; 1876 bis 1953) Millionen Menschen aufgrund fingierter Beschuldigungen hingerichtet wurden oder in Straflagern verschwanden.

Doch die Biographin hatte Pech, denn Pjatigorskij lebte noch. Zwar stimmte, daß Landau ihn damals aus der Theoretiker-Gruppe des Physik-Instituts in Charkow (Ukraine) ausgeschlossen hatte. Der große Mann – von seinen Studenten kurz Dau genannt – konnte sehr hart sein; an seinem Arbeitszimmer hing ein Warnschild: „Vorsicht! Bissig!" Aber Pjatigorskij hatte nie aufgehört, Landau zu verehren. Entsetzt über Maja Besserabs Anschuldigung brachte er sie im Sommer 1990 vor Gericht. Der zuständige Richter forderte den KGB auf, Landaus Akte zu überprüfen. Darin wurde Pjatigorskij nicht erwähnt, und Maja Besserab entschuldigte sich öffentlich.

Vermutlich fiel dem KGB erst beim Studium der alten Dokumente auf, daß der Stolz der sowjetischen Wissenschaft nicht das unschuldige Opfer stalinistischen Verfolgungswahns gewesen war, sondern ein echter antisowjetischer Aktivist. Im Jahre 1991 veröffentlichte der KGB den Inhalt der Landau-Akte fast vollständig in einer kurzlebigen Zeitschrift der Glasnost-Ära namens „Bulletin des Zentralkomitees der Kommunistischen Partei" (Bild 2).

Im Innern des KGB

Durch Zufall sah ich die Landau-Akte einige Wochen vor ihrer Veröffentlichung mit eigenen Augen. Bald nach Beginn der sogenannten Perestroika (Umgestaltung) in den späten achtziger Jahren bekam ich eine Forschungsstelle am Institut für Wissenschafts- und Technikgeschichte in Moskau. Sein Direktor war der Sohn des früheren Verteidigungsministers Dimitrij Ustinow (1908 bis 1984). In der Hoffnung, sein Name könnte mir fest verschlossene Türen öffnen, versuchte ich auf gut Glück in die KGB-Archive vorzudringen.

Mit äußerster Sorgfalt formulierte ich einen Brief, der hervorhob, daß über das Schicksal vieler bedeutender sowjetischer Physiker, die in den dreißiger Jahren verhaftet worden waren, fast nichts

bekannt sei. Ich zählte zwei Dutzend Namen auf und fragte, ob man als Historiker ihre Akten studieren dürfe. Nach zwei Wochen Bedenkzeit unterzeichnete Ustinow den Brief; zu meinem großen Glück landete das Schreiben, wie ich später erfuhr, auf dem Schreibtisch eines ungewöhnlich liberalen Mitglieds der KGB-Führung.

Zwei Monate später teilte mir die Behörde mit, ich dürfe die Akte untersuchen – in ihrem Hauptquartier im Lubjanka-Gebäude, wo unzählige Häftlinge die ersten Schreckensstunden verbracht hatten. Am Eingang durchsuchte mich ein Wachposten mit aufdringlicher und peinlicher Gründlichkeit. Es gab keinen Leseraum, nur ein sehr kleines Zimmer für die Verwandten der Häftlinge. Mit der Begründung, es wäre unbequem für mich, in einem Raum voll weinender Menschen zu arbeiten, wiesen mir meine Gastgeber das Büro eines erkrankten Angestellten zu. Vielleicht war just in diesem Raum, der noch die Holztäfelung aus den dreißiger Jahren trug, einst Landau verhört worden. Aus dem Fenster konnte ich auf das innere Gefängnis blicken, in dem man ihn eingekerkert hatte.

Auch ich wurde verhört. Zwei Beamte wollten wissen, wieso die Akten toter Physiker irgend etwas Interessantes enthalten sollten. Während ich antwortete, begann ich mich zu fragen, warum man mich überhaupt in das KGB-Hauptquartier eingelassen hatte. Gewiß war den Verhörenden bekannt, daß meine jüdischen Eltern soeben aus Rußland in die Vereinigten Staaten ausgewandert waren – wollte man mir eine Falle stellen? Erst mit der Zeit beruhigte ich mich und sah ein, daß der KGB sich nur angestrengt bemühte, sein Ansehen in der Öffentlichkeit zu verbessern. Als die beiden Männer schließlich fragten, ob der sowjetische Naturforscher und Friedensnobelpreisträger Andrej Sacharow (1921 bis 1989) wirklich ein guter Physiker gewesen sei oder bloß ein überschätzter Dissident, überzeugte ich mich erleichtert, daß sie auch nur neugierig waren.

Nach einigen Stunden ließ man mich mit fünf Akten auf dem Schreibtisch allein. Sie stammten aus den Jahren 1930 bis 1952; einige wirkten äußerst unvollständig. Über Landau, der erst in der

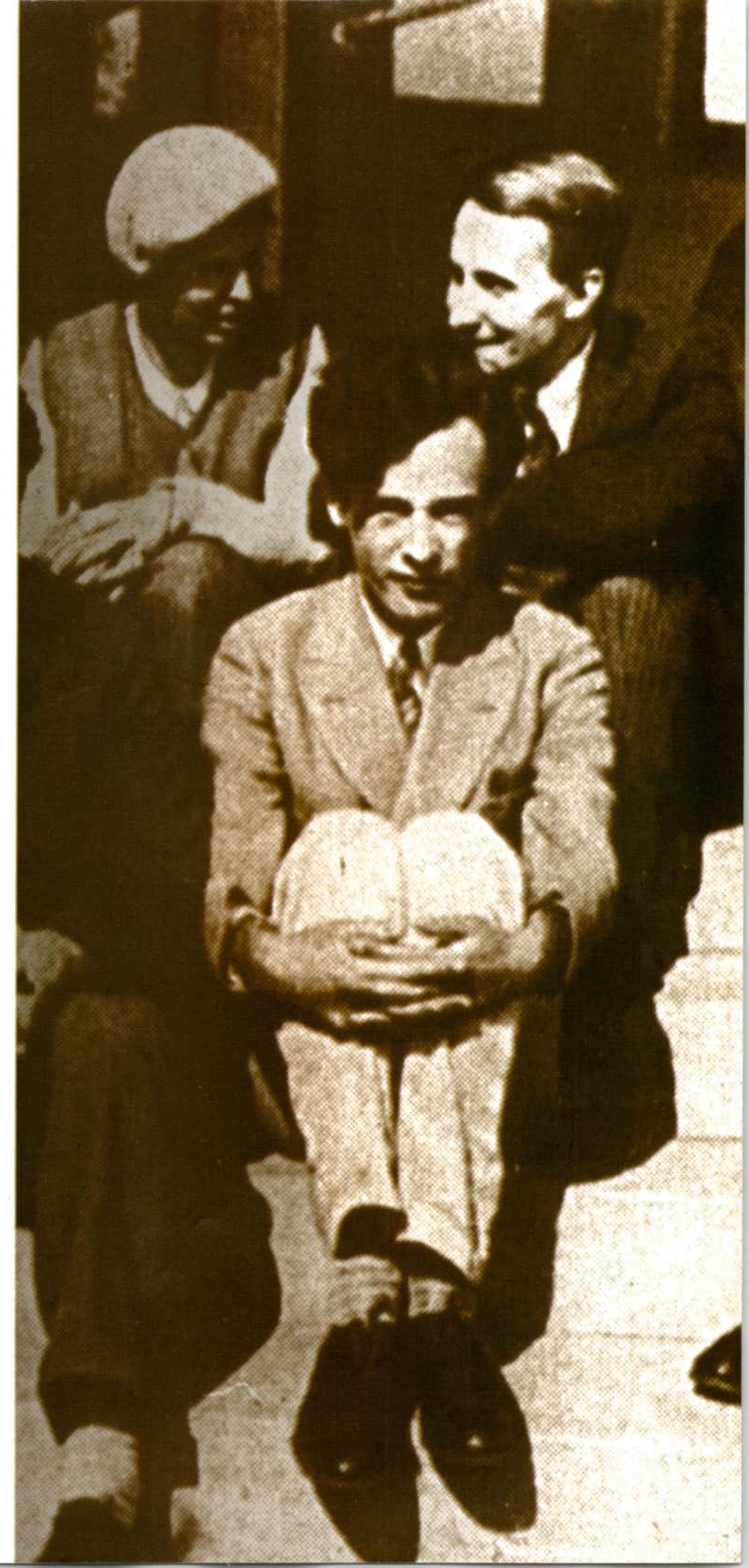
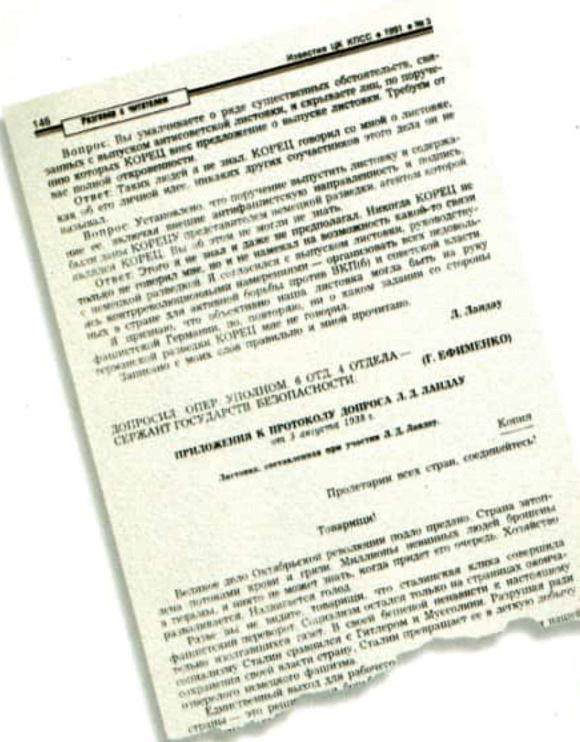


Bild 1: Dieser Schnappschuß aus dem Jahre 1934 zeigt Lew Landau im Kreise seiner Mitarbeiter auf den Stufen des Physikalisch-technischen Instituts in Charkow (Ukraine). Kurze Zeit später brachte ihn sein Versuch, die Grundlagenforschung am Institut zu erhalten, in ernste Schwierigkeiten mit der politischen Führung.



Известия ЦК КПСС • 1991 • № 3

ДОПРОСИЛ: ОПЕР. УПОЛНОМ. 4 ОТД. 4 ОТДЕЛА — СЕРЖАНТ ГОСУДАРСТВ. БЕЗОПАСНОСТИ (Г. ЕФИМЕНКО)

ПРИЛОЖЕНИЯ К ПРОТОКОЛУ ДОПРОСА Л. Д. ЛАНДАУ

Пролетарии всех стран, соединяйтесь!

Товарищи!



ОРДЕР №



Bild 2: Im März 1938 verfaßten Landau und sein Freund Moissej Koretz ein tollkühnes Flugblatt, das zum Sturz des Stalinschen Regimes aufrief; kurz darauf wurden sie von der politischen Polizei verhaftet und verhört. Erst 1991 veröffentlichte der KGB den Wortlaut des subversiven Textes (links), den Haftbefehl (Mitte) sowie Landaus schriftliches Geständnis (rechts), in dem er nach zweimonatiger Haft seine Abkehr vom sowjetischen System detailliert begründete. Außerdem überließ der KGB 1991 der sowjetischen Zeitschrift „Priroda" die im Gefängnis für die Verbrecherkartei aufgenommene Photographie – allerdings nur Landaus Vorderansicht (Mitte); die Profilaufnahme, so die Begründung, sei allzu deprimierend.

Endphase des großen Terrors – als eine gewisse Normalisierung einkehrte – verhaftet worden war, gab es eine derart ordentlich geführte Akte, daß mir zunächst der Verdacht kam, es handle sich um eine Fälschung aus neuester Zeit. Doch letztlich kam ich zu dem Schluß, daß sämtliche Dokumente, auch die möglicherweise gefälschten, aus den dreißiger Jahren stammten. Leider konnte ich keine Kopien anfertigen, sondern nur handschriftliche Exzerpte.

In derselben Nacht wie Landau waren auch die Physiker Juri B. Rumer und Moissej Koretz verhaftet worden. Rumer leistete Pionierarbeit auf dem Gebiet der Quantenchemie und veröffentlichte mit Landau ein Buch über Relativitätstheorie. Koretz war zwar nicht berühmt, aber ein enger Freund und Vertrauter, bei dem Landau in praktischen Lebensfragen Rat suchte (Bild 3).

In Rumers Akte fand ich drei anonyme Spitzelberichte. Einer war undatiert und bizarr: Angeblich sei ein Bekannter Rumers der Sohn eines Rabbi, lebe in Berlin und arbeite für Hitlers Geheimpolizei Gestapo. Der zweite stammte von März 1938 und beschrieb eine Unterhaltung zwischen Rumer und Landau über sowjetische Funktionäre; Landau habe die Meinung vertreten, von Leuten, die als Untermenschen geboren seien, könne man nichts Gutes erwarten.

Im dritten Bericht vom 19. April enthüllte der Informant, Landau und Rumer wüßten von einem antisowjetischen Flugblatt, das zur Verteilung bestimmt sei. Das handschriftliche Original dieses sensationellen Flugblatts befand sich angeblich in der Akte von Koretz – die, wie man mir sagte, im Büro des Generalstaatsanwalts liege. Landaus Akte enthielt jedoch eine maschinenschriftliche Kopie.

Das Pamphlet sollte vervielfältigt und während der Parade zum 1. Mai heimlich verteilt werden. Wörtlich heißt es darin:

Genossen!

Das große Ziel der Oktoberrevolution wurde schmählich verraten... Millionen Unschuldiger wurden ins Gefängnis geworfen und niemand weiß, wann er selbst an der Reihe sein wird...

Seht Ihr denn nicht, Genossen, daß die Stalin-Clique einen faschistischen Putsch vollbracht hat! Sozialismus gibt es nur noch auf den Seiten der Zeitungen, die sich heillos in Lügen verstrickt haben. Mit seinem wütenden Haß auf den wahren Sozialismus ist Stalin zum Ebenbild von Hitler und Mussolini geworden. Um seine Macht zu erhalten, zerstört Stalin das Land und macht es zur leichten Beute für den bestialischen deutschen Faschismus...

Das Proletariat unseres Landes, das die Macht des Zaren und der Kapitalisten gebrochen hat, wird auch einen faschistischen Diktator und seine Clique besiegen können.

Lang lebe der 1. Mai, der Tag des Kampfes für den Sozialismus!

Die Antifaschistische Arbeiterpartei

Meines Wissens ist dieses Manifest eine von nur drei offenen Verurteilungen Stalins, die sowjetische Bürger in der Zeit des Terrors zu formulieren wagten. Der zweite Fall ist ein offener Brief, den ein sowjetischer Diplomat 1939 nach seiner Flucht nach Paris veröffentlichte; er starb bald darauf unter mysteriösen Umständen. Das dritte Beispiel ist eine Notiz, die der Geochemiker Wladimir Wernadskij (1863 bis 1945) – Gründer und Direktor des staatlichen Radium-Instituts in Petrograd (Sankt Petersburg) – in sein privates Tagebuch schrieb.

Eine solche Verurteilung schriftlich zu fixieren und sogar ihre Verteilung zu planen setzte unglaublichen Mut, wenn nicht Tollkühnheit voraus. Um zu verstehen, warum die Täter nicht sofort erschossen wurden, müssen wir etwas weiter ausholen.

Ein Kind der Revolution

Landau wurde am 22. Januar 1908 als Sohn jüdischer Eltern in der Erdölstadt Baku (Aserbeidschan) geboren. Sein Vater arbeitete als Ingenieur für die örtliche Ölindustrie, seine Mutter war Ärztin. Zur Zeit der Oktoberrevolution von 1917 war Landau erst neun Jahre alt. Schon mit 14 Jahren schrieb er sich an der Universität von Baku ein, und zwei Jahre später wechselte er an die staatliche Universität von Leningrad. Er promovierte 1927 und setzte seine Forschungen am Leningrader Physikalisch-technischen Institut fort – der Wiege der sowjetischen Physik.

Im Jahre 1929 gewann Landau ein Auslandsstipendium. In Kopenhagen arbeitete er ein Jahr lang mit dem schon damals für seine Beiträge zur neuen Quantenphysik berühmten Dänen Niels Bohr (1885 bis 1962; Nobelpreis 1922) zusammen und betrachtete ihn fortan als seinen Mentor. In Cambridge traf er Pjotr Kapitza (1894 bis 1984; Nobelpreis 1978), einen einflußreichen sowjetischen Experimentalphysiker, der seit 1921 in den Cavendish-Laboratorien tätig war. Als Lösung für ein von Kapitza gestelltes Problem entwickelte Landau die Theorie des Diamagnetismus von Elektronen in Metall – seine erste bedeutende wissenschaftliche Leistung.

Drei Jahre später übernahm Landau die Leitung der theoretischen Abteilung des Physikalisch-technischen Instituts der Ukraine in Charkow (Bild 1). Dort begann er seine bahnbrechenden Forschungen über Phasenübergänge der zweiten Art – subtile Veränderungen eines Systems, bei denen (anders als beim Gefrieren von Wasser) Wärme weder abgegeben noch absorbiert wird. Außerdem arbeitete er an einer Theorie des Ferromagnetismus (der spontanen Magnetisierung bestimmter Feststoffe).

Als fähiger und begeisterter Lehrer begann er überdies gemeinsam mit seinem früheren Studenten Jewgenij M. Lifschitz den zehnbändigen Klassiker „Lehrbuch der theoretischen Physik“ zu verfassen (auf russisch ab 1938, deutsch seit 1965 zahlreiche aktualisierte Auflagen). Sein Institut erwarb rasch den Ruf, erstklassige Wissenschaftler auszubilden, die fast jedem Problem der theoretischen Physik gewachsen waren.

Der niederländische Physiker Hendrik Casimir (geboren 1909) lernte Landau in Kopenhagen kennen und erinnert sich an ihn als leidenschaftlichen Kommunisten, der sehr stolz auf seine revolutionären Wurzeln gewesen sei. Der Enthusiasmus, mit dem Landau sich dem Aufbau der sowjetischen Wissenschaft widmete, speiste sich aus seiner Begeisterung für den Sozialismus. Im Jahre 1935 veröffentlichte er den merkwürdigen Artikel „Die Bourgeoisie und die Physik der Gegenwart“ in der führenden sowjetischen Zeitung „Iswestija“. Darin griff er nicht nur den bourgeoisen Hang zu religiösem Aberglauben und egoistischer Bereicherung an, sondern pries auch die „beispiellosen Möglichkeiten zur Entwicklung der Physik in unserem Land, die von der Partei und der Regierung geschaffen wurden“. Weil er deutliche Worte liebte, bezeichnete Landau sich und seine Freunde als Kommunisten, während er jene, die er haßte, Faschisten nannte; ältere Fachkollegen gehörten für ihn zur Spezies Wisent (das fast ausgestorbene russische Wildrind).

Doch trotz seines Glaubens an das sowjetische System wurde Landau von einigen sozialistischen Autoren aus ideologischen Gründen attackiert. In den späten zwanziger Jahren sorgte das Problem, daß beim nuklearen Beta-Zerfall ein Teil der Zerfallsenergie scheinbar spurlos verschwand, für erhebliche Aufregung. Landau und andere unterstützten anfangs Bohrs Meinung, dieser Prozeß verletze das Prinzip der Energieerhaltung. Bald entdeckte Landau allerdings, daß dies der Gravitationstheorie Albert Einsteins (1879 bis 1955; Nobelpreis 1921) widersprach, und verwarf die Hypothese. Letztlich setzte sich die Lösung durch, die der österreichisch-amerikanische Physiker Wolfgang Pauli (1900 bis 1958; Nobelpreis 1945) 1931 vorgeschlagen hatte: Für die scheinbar fehlende Energie ist ein – erst 1956 als Neutrino nachgewiesenes – neutrales und masseloses Teilchen verantwortlich, das beim Beta-Zerfall entsteht. Unglücklicherweise hatte der Mitbegründer des Marxismus Friedrich Engels (1820 bis 1895) erklärt, daß das Gesetz von der Erhaltung der Energie für alle Zeiten wissenschaftliche Gültigkeit haben werde, und Landau wurde in der heimischen Presse für seine (vorübergehende) Blasphemie streng getadelt.

Außerdem wurden seine politischen Ansichten bald einer noch viel härteren Belastungsprobe unterworfen. Im Jahre 1934 bekam das Charkower Institut einen neuen Direktor, der die Forschung auf militärische und angewandte Arbeiten orientieren sollte. Landau kämpfte





Bild 3: Landaus Mitarbeiter Koretz (links) und Jurij B. Rumer (oben) wurden in derselben Nacht verhaftet. Koretz verbrachte 20 Jahre in Straflagern; Rumer arbeitete zehn Jahre lang in einem gefängnisartigen Forschungsinstitut, einem sogenannten Scharaschka. Pjotr Kapitza (rechts) rettete Landau vor einem ähnlichen Schicksal, indem er behauptete, nur der große Theoretiker könne eine soeben gemachte rätselhafte Entdeckung erklären. Tatsächlich vermochte Landau in kurzer Zeit die erste Theorie der Superfluidität zu formulieren, wofür er später den Nobelpreis erhielt.



vehement für die reine Wissenschaft. Er schlug vor, das Institut zu teilen, damit ein Zweig der theoretischen Physik gewidmet bleibe.

Auf dem Schwarzen Brett des Instituts, wo lebhaft Argumente für und wider ausgetauscht wurden, trat Koretz engagiert für Landaus Plan ein. Pjatigorskij – nicht ahnend, daß Widerstand gegen die offizielle Direktive als Sabotage der sowjetischen Militärvorhaben ausgelegt würde – bestätigte diesen Plan gegenüber der Verwaltung (wofür Landau ihn des Instituts verwies). Im November 1935 wurde Koretz verhaftet.

Landau trat tapfer für seinen Freund ein und appellierte an die ukrainische KGB-Führung. Tatsächlich wurde Koretz – für jene Zeiten erstaunlich genug – „aus Mangel an Beweisen" freigelassen. (Wenige Monate später erschoß sich der KGB-Verantwortliche von Charkow. Vielleicht war er einer der vielen Idealisten, die mit dem wachsenden Widerspruch zwischen kommunistischen Zielen und trister Wirklichkeit nicht leben konnten.) Die Akte von Koretz enthält jedoch den warnenden Hinweis, der KGB solle ihn im Auge behalten, denn obwohl seine „Schuld nicht bewiesen wurde", sei er „Mitglied einer konterrevolutionären zerstörerischen Organisation, die von Landau geführt wird".

Im Jahre 1937 verhaftete der KGB mehrere in Charkow tätige deutsche Physiker sowie andere Wissenschaftler. Bevor sie erschossen wurden, „gestanden" Landaus Freunde Lew Schubnikow und Lew Rosenkewitsch, er sei Anführer einer konterrevolutionären Organisation. Landau zog es vor, an einen Ort zu fliehen, wo er vielleicht sicherer sein würde. Kapitza bot ihm an, in Moskau die theoretische Abteilung des Instituts für Probleme der Physik zu leiten; im Februar ging Landau dorthin. Bald folgte Koretz; Rumer arbeitete bereits dort. Doch schon bald, am 28. April 1938, wurden Landau und seine beiden Freunde verhaftet.

Im Gefängnis

Landaus Studenten und Mitarbeiter wurden getadelt, weil sie seine Lehren „gegen den dialektischen Materialismus und sogar gegen das Gesetz der Energieerhaltung" unterstützt hätten. Sie wiederum glaubten, jemand habe Landau als Revanche für eine frühere Respektlosigkeit denunziert. Gewiß hatte Landau Feinde, denn er trat anderen gern auf die Füße. Zum Beispiel hatte er an einem 1. April eine offiziöse Bekanntmachung verschickt, in der die Mitglieder des Charkower Instituts nach ihrer Fähigkeit eingestuft wurden und dementsprechend entlohnt werden sollten – ein Spaß, der bei den Oberen nicht gut ankam.

Tatsächlich stand viel mehr auf dem Spiel als nur Unbotmäßigkeit und ideologische Abweichung: Man klagte Landau an, Anführer einer konterrevolutionären Organisation zu sein; als „Beweis" reichten der Geheimpolizei die seinen Mitarbeitern abgepreßten Geständnisse. Der Inhalt des Flugblatts entschied nur über den Zeitpunkt der Verhaftung – eine Woche vor der Parade zum 1. Mai.

Wie sich herausstellte, hatte Rumer mit dem Pamphlet gar nichts zu tun; das bezeugten sowohl Landau als auch Koretz, und dieser Teil der Anklage wurde fallengelassen. Dennoch mußte Rumer aufgrund der erfundenen Beschuldigung, er spioniere für Deutschland, zehn Jahre in einem sogenannten Scharaschka verbringen – einem wissenschaftlich-technischen Institut, das wie eine Haftanstalt geführt wurde.

Landaus wissenschaftliche Leistungen

Als einer der ersten führte Landau 1927 die sogenannte Dichtematrix ein – ein mathematisches Werkzeug zur Behandlung gemischter Quantenzustände. Er beschrieb das Verhalten eines Elektronengases und fand heraus, daß Elektronen in einem äußeren Magnetfeld diskrete Energiezustände einnehmen, die man heute Landau-Niveaus nennt. Auf dem Gebiet der Astrophysik postulierte er die Existenz sogenannter Neutronenkerne, die später als Neutronensterne bezeichnet wurden; außerdem erklärte er mit seiner Kaskadentheorie, wie die kosmische Strahlung in der Lufthülle Elektronenschauer hervorruft.

Zu Landaus größten Entdeckungen gehören die Phasenübergänge der zweiten Art, bei denen eine Substanz aus einem geordneten Zustand in einen ungeordneten wechselt, ohne Wärme zu absorbieren; ein Beispiel ist der Übergang tiefgekühlten Heliums in den superfluiden Zustand. Landau postulierte zur Erklärung der Superfluidität unter anderem sogenannte Rotonen; solche quantisierten Wirbelanregungungen sind unterdessen nachgewiesen worden. Außerdem führte er mit dem Ordnungsparameter, einer Art makroskopischer Wellenfunktion, ein mächtiges theoretisches Werkzeug ein: Beim superfluiden Helium beschreibt der Ordnungsparameter das Verhalten der Atome in ihrem gemeinsamen Quantenzustand; bei Supraleitern läßt sich damit angeben, wie der Strom mit einem äußeren Magnetfeld wechselwirkt, und bei superfluidem Helium-3 erklärt der Parameter eine Vielzahl komplexer Konfigurationen.

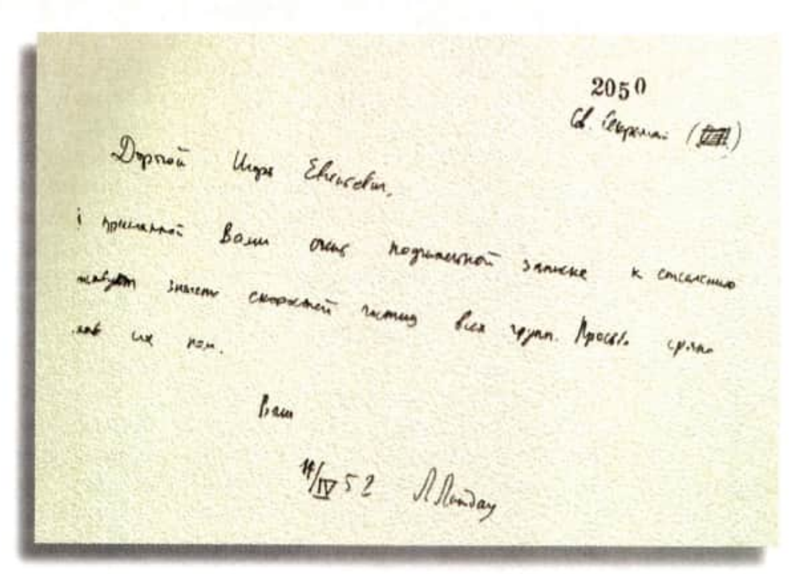


Zur Feier von Landaus 50. Geburtstag im Jahre 1958 ritzten seine Studenten seine größten Errungenschaften als „Landaus zehn Gebote" auf zwei Gesetzestafeln. Er prägte den Denkstil von Generationen theoretischer Physiker, die nach seinem noch heute gebräuchlichen Lehrbuch studierten.

In den fünfziger Jahren entwickelte Landau gemeinsam mit seinem Studenten Witalij Ginsburg theoretisches Rüstzeug, mit dem sich – wiederum mittels eines Ordnungsparameters – das universelle Phänomen der gebrochenen Symmetrie einfach beschreiben läßt. Zwar bezog sich die Landau-Ginsburg-Theorie ursprünglich nur auf die Supraleitung, doch heute spielt das Prinzip der Symmetriebrechung in Kosmologie und Teilchenphysik eine fundamentale Rolle.

Landau untersuchte auch, wie Ferromagnete – zum Beispiel Kompaßnadeln – sich als mikroskopische Domänen einheitlicher Magnetisierungsrichtung organisieren. Er arbeitete auf dem Gebiet der Plasmaphysik und entwickelte 1956 die Theorie der Fermi-Flüssigkeiten, die aus stark wechselwirkenden elektronenähnlichen Quasiteilchen aufgebaut sind. Sein Interesse galt auch der Elementarteilchentheorie: Er entwickelte ein statistisches Bild des Atomkerns, stellte in der Quantenelektrodynamik die sogenannten Landau-Bedingungen auf und postulierte mit anderen Forschern das Erhaltungsprinzip der Ladungsparität. Damit ist die Liste von Landaus Leistungen noch keineswegs erschöpft.

Landau brachte man ins Lubjanka-Gefängnis. Eine offenbar von einem KGB-Offizier hastig gekritzelte Notiz in der Akte besagt, daß man Landau zwang, täglich sieben Stunden zu stehen, und ihm mit der Abschiebung in das noch mehr gefürchtete Lefortowo-Gefängnis drohte. Nach zwei Monaten war er gebrochen und schrieb ein sechsseitiges Geständnis – das aufschlußreichste Dokument in seiner Akte. (Jeder Gefangene unterzeichnete bei der Entlassung ein Schweigegelübde, und Landau sprach niemals über diese Zeit.)



2050

Дорогой Игорь Евгеньевич,

Ваш

11/IV 52

Bild 4: Mit diesem kurzen Brief, der seinerzeit unter höchste Geheimhaltung fiel, bat Landau seinen Kollegen Igor Jewgenjewitsch Tamm, ihm Daten über Teilchengeschwindigkeiten zu liefern, die er für numerische Berechnungen zu der ersten sowjetischen Wasserstoffbombe benötigte.

Darin heißt es: „Anfang 1937 kamen wir zu dem Schluß, daß die Partei entartet war und daß die sowjetische Regierung nicht länger im Interesse der Werktätigen, sondern im Interesse einer kleinen herrschenden Gruppe handelte, daß die Interessen des Landes es verlangten, die gegenwärtige Regierung zu stürzen und in der UdSSR einen Staat zu schaffen, der die Kolchosen [die landwirtschaftlichen Betriebe] und das staatliche Eigentum der Industrie bewahren, aber auf den Prinzipien der bürgerlich-demokratischen Staaten aufbauen sollte.“

Obwohl solche Geständnisse angesichts der Umstände, unter denen sie erzwungen wurden, nicht allzu ernst genommen werden dürfen, ist diese Aussage so ungewöhnlich, daß ich sie für wahr halte. Die beiden Physiker hatten eine Schlußfolgerung gezogen, welche die meisten ihrer Landsleute noch ein halbes Jahrhundert später nicht wahrhaben wollten. Koretz war es, der den Freund von der Notwendigkeit praktischen Handelns überzeugt und das Flugblatt niedergeschrieben hatte; doch der politische Kopf war Landau. Er war für seine Schreibfaulheit bekannt: Seine Texte – auch das berühmte Lehrbuch der theoretischen Physik – ließ er meist von Mitarbeitern zu Papier bringen. (Das Geständnis ist der längste handschriftliche Text, den Landau in seinem Leben verfaßt hat.) Damit man das Manifest ernst nahm, hatten die beiden Verschwörer den Namen einer fiktiven Organisation daruntergesetzt.

Koretz verbrachte 20 Jahre in Straflagern und kehrte 1958 nach Moskau zurück; dort traf ich ihn einige Male, bevor er 1984 an Krebs starb. Er begeisterte sich für Naturforschung und arbeitete für ein populäres Wissenschaftsmagazin. Trotz seiner Leiden war er wunderbar lebhaft und agil. Er erzählte mir viele Anekdoten über Landau – aber nie sprach er über die Umstände ihrer Verhaftung. Koretz wurde niemals offiziell rehabilitiert; das deutet darauf hin, daß seine Verhaftung – anders als die der meisten Opfer des Terrors – einen echten Grund hatte.

Kapitza rettete Landau. Als Erfinder einer neuen Technik zur Sauerstoffgewinnung, die für die Metallurgie und somit für industrielle Anwendungen große Vorteile brachte, hatte Kapitza ausgezeichnete Beziehungen zur Regierung. Zudem war er im Umgang mit Ämtern äußerst routiniert: Im Laufe seines Lebens schrieb er mehr als 100 Briefe an den Kreml, um auf die Wissenschaftspolitik Einfluß zu nehmen oder Physiker zu retten – etwa den Quantenfeldtheoretiker Wladimir Fok (1898 bis 1974).

Im Jahre 1938 ging die Phase des schlimmsten Terrors zu Ende; Geheimdienst-Chef Nikolaj Jeschow wurde hingerichtet und durch Lawrentij P. Berija (1899 bis 1953) ersetzt. Nach zweijährigem Blutbad war Stalin am Ziel – er hatte alle Rivalen, tatsächliche und eingebildete, vernichtet. Kapitza erkannte die Gunst der Stunde und schrieb an den Ministerpräsidenten (und späteren Außenminister) Wjatscheslaw Michailowitsch Molotow (1890 bis 1986), er habe soeben eine Entdeckung „auf dem rätselhaftesten Gebiet der modernen Physik“ gemacht; kein anderer als Landau könne sie theoretisch erklären. Am Vorabend des 1. Mai 1939 wurde Landau nach einjähriger Haft gegen Kaution entlassen. Binnen weniger Monate vermochte er die von Kapitza entdeckte Superfluidität mittels Phononen (quantisierten Schallwellen) und Rotonen (quantisierten Wirbeln) zu beschreiben. Einige Jahrzehnte später wurden beide für ihre Leistung mit Nobelpreisen ausgezeichnet (Landau 1962, Kapitza 1978).

Im Jahre 1939 heiratete Landau K.T. Drobansewa, 1946 wurde ihr Sohn Igor geboren. Die Ehe verlief ungewöhnlich. Anscheinend glaubte Landau an freie Liebe und drängte seine Studenten und seine bestürzte Ehefrau, sich entsprechend zu verhalten.

Wenige Jahre nach Landaus Freilassung setzte Stalin das sowjetische Atombombenprojekt in Gang; nach dem Abwurf der amerikanischen Uranbombe auf Hiroshima erhielt es höchste Priorität. Kapitzas Institut wurde diesem Zweck untergeordnet, und Stalin setzte Geheimpolizeichef Berija als Aufpasser ein. Kapitza war zwar kein Pazifist, doch fand er es unerträglich, unter Stalins Obergendarm in einer Atmosphäre größter Geheimhaltung zu arbeiten. Er beschwerte sich schriftlich bei Stalin: Berija sei unfähig, ein solches Projekt zu leiten.

Das war ein extrem riskantes Spiel. General Andrej Chrulow, ein Freund Kapitzas, berichtete ihm von einer Unterhaltung zwischen Berija und Stalin, die er mitgehört hatte. Berija wollte Kapitzas Kopf; doch Stalin erwiderte, er dürfe Kapitza zwar all seiner Funktionen entheben, ihn aber nicht töten. Offenbar respektierte Stalin den weltweiten Ruf des Physikers, der immerhin Mitglied der britischen Royal Society war.

Die sowjetische Wasserstoffbombe

Kapitza entging zwar der Hinrichtung, blieb aber bis zu Stalins Tod unter einer Art Hausarrest. Landau wurde dem geheimen Bombenprojekt zugeteilt. Er hatte dort nicht theoretische Physik zu treiben, sondern eher numerische Mathematik (Bild 4). Zusammen mit den ihm unterstellten Physikern berechnete er die Dynamik der ersten sowjetischen Wasserstoffbombe, der sogenannten Slojka (Blätterteig-Gebäck), die mit Lithiumdeuterid gefüllt war. Nach Auskunft des deutsch-amerikanischen Physikers Hans Bethe (geboren 1906; Nobelpreis 1967), der an der Entwicklung der amerikani-

schen Nuklearwaffen entscheidend mitwirkte, zogen die Amerikaner ursprünglich dieselbe Verbindung – mit anderen Füllmaterialien – für eine ähnliche Konstruktion in Betracht. Doch vermochten sie im Gegensatz zu Landau nicht, die Sprengkraft rechnerisch abzuschätzen.

Die mathematischen Mittel, die Landau zu diesem Zweck entwickelt hatte, wurden während der ersten Entspannungsphase des nuklearen Wettrüstens teilweise von der Geheimhaltung befreit und 1958 veröffentlicht. Diese Arbeit über numerische Integration wirkt in Landaus gesammelten Werken eher wie ein Fremdkörper. Im selben Band findet sich seine wohl einflußreichste Veröffentlichung, die er zusammen mit Witalij Ginsburg 1950 während der Forschungsarbeiten zur Bombe verfaßte. Darin wird eine umfassende Theorie entwickelt, mit der sich die unterschiedlichsten Systeme – Supraleiter, Elementarteilchen, chemische Mischungen und so weiter – in einfacher Weise beschreiben lassen. Sie nimmt das Phänomen der Symmetriebrechung vorweg, das für die moderne Kosmologie und Teilchenphysik von grundlegender Bedeutung ist.

Ironischerweise wurde Landau für seinen Beitrag zur Entwicklung der Atom- sowie der Wasserstoffbombe nicht nur zweimal mit dem Stalin-Preis ausgezeichnet (1949 und 1953), sondern er erhielt obendrein 1954 auch noch den Titel „Held der sozialistischen Arbeit". Doch 1957, so vermute ich, ersuchte Landau bei der Kommunistischen Parteizentrale um die Erlaubnis, ins Ausland zu reisen. Auf Anfrage der Partei lieferte der KGB Mitschriften von Gesprächen und Unterhaltungen, die Landau mit seinen Freunden zwischen 1947 und 1957 geführt hatte; das Material war mit „speziellen Techniken", wie der KGB sich ausdrückte, und von Spitzeln beschafft worden. Das äußerst aufschlußreiche Dokument landete in den Archiven der Kommunistischen Partei.

In den Mitschriften beschreibt sich Landau als „Wissenschaftssklave". Das ist angesichts seiner rebellischen Natur keine Überraschung; außerdem war er durch seine Erfahrungen in den dreißiger Jahren zum erbitterten Gegner Stalins geworden. Doch aus den Dokumenten spricht eine tiefergehende Veränderung seiner politischen Überzeugungen. Bei einer Gelegenheit bemerkte ein Freund, daß Lenin, sollte er plötzlich wieder zum Leben erwachen, entsetzt wäre über das, was er sehen müßte. „Lenin wandte dieselben Unterdrückungsmethoden an", entgegnete Landau.

Später sagte er: „Unser Regime ist, wie ich seit 1937 eingesehen habe, eindeutig faschistisch, und es könnte sich nicht von selbst so einfach verwandeln... Ich glaube, solange dieses Regime besteht, ist es lächerlich, darauf zu hoffen, daß es sich zu etwas Anständigem entwickelt... Die Frage nach einer friedlichen Abschaffung unseres Regimes ist die Frage nach der Zukunft der Menschheit... Ohne Faschismus gibt es keinen Krieg." Er schloß mit der Bemerkung: „Es ist ganz klar, daß Lenin der erste Faschist war."

Man muß sich vor Augen führen, wie außergewöhnlich diese Ansichten waren. Fast alle Kollegen Landaus waren damals zutiefst prosowjetisch – darunter Igor Jewgenjewitsch Tamm (1895 bis 1971), der 1958 als erster Sowjetbürger den Nobelpreis für Physik erhielt, und Andrej Sacharow, der 1975 der erste sowjetische Friedensnobelpreisträger wurde. Selbst wenn sie Stalins Verantwortung für die in seinem Namen begangenen Verbrechen erkannten, sahen sie in ihm den Kriminellen, der Lenins Sache verraten hatte; Lenin selbst blieb für sie ein Held.

Soweit ich weiß, gab es nur zwei Physiker, die aussprachen, daß sie die Arbeit an Stalins Bombenprojekt verabscheuten. Der eine war Landau, der andere Michail Leontowitsch (1903 bis 1981), der 1951 Leiter der theoretischen Forschung im sowjetischen Kernfusionsprogramm wurde. Landau diente dem Projekt, weil es ihn vor den Behörden schützte. Er suchte seinen Beitrag zu begrenzen und verfluchte einmal den Physiker Yakow B. Zel'dowitsch (1914 bis 1987) als „dieses Miststück", weil der ihn stärker einspannen wolle. Nach Stalins Tod bemerkte Landau zu seinem Freund und Schüler Isaac M. Chalatnikow: „Das war's. Er ist weg. Ich habe vor ihm keine Angst mehr, und ich werde nicht länger an [Kernwaffen] arbeiten." Tatsächlich verließ Landau das Bombenprojekt.

Freilich stellt sich die Frage: Wenn er wirklich ungern an der Bombe arbeitete, warum leistete er dann so wichtige Beiträge dafür? Landaus Schüler Chalatnikow, der spätere Direktor des 1965 geschaffenen Landau-Instituts für theoretische Physik, gab mir darauf zur Antwort, Landau sei einfach unfähig gewesen, Schund abzuliefern.

Jedenfalls war Landau wohl der einzige Mitarbeiter am Bombenprojekt, der das sowjetische System so bedingungslos verwarf und mutig genug war, dies auch auszusprechen. Seine Position muß für ihn besonders qualvoll gewesen sein, denn er arbeitete im Bewußtsein, einem durch und durch verabscheuungswürdigen Regime die mächtigste Massenvernichtungswaffe in die Hand zu geben.

Im Jahre 1962 erlitt Landau bei einem Autounfall schwerste Hirnverletzungen. Er wurde sechsmal dem klinischen Tod entrissen und überlebte mit veränderter Persönlichkeit und unter tragischem Verlust seines wissenschaftlichen Genies. Ihm selbst war wohl bewußt, wie es um ihn stand. Er starb am 1. April 1968; sein Student Alexander I. Ahkieser erinnert sich, daß er die Todesnachricht zunächst für einen von Daus typischen Aprilscherzen hielt.

Nachdem ich zwei Wochen lang KGB-Akten studiert hatte, konnte ich einfach nicht mehr weitermachen. Die Häufung der ruinierten Lebensläufe, die darin dokumentiert waren, überwältigte mich. Nach dem Zerfall der Sowjetunion im Jahre 1991 wurde der KGB umstrukturiert, und seitdem, soweit mir bekannt ist, hat kein Historiker mehr regelmäßigen Zugang zu den Archiven. Zweifellos bergen die Akten noch viele unglaubliche Geschichten – vielleicht auch ein paar mehr über den außergewöhnlichen Physiker Lew Landau.

Gennady Gorelik ist derzeit als Forscher am Zentrum für Philosophie und Wissenschaftsgeschichte der Universität Boston (Massachusetts) tätig. Er promovierte 1979 am Institut für Wissenschaftsgeschichte und Technologie der russischen Akademie der Wissenschaften. Unterstützt durch ein Guggenheim-Stipendium und die Mac-Arthur-Stiftung schreibt er an einer Biographie Andrej Sacharows.

Literaturhinweise

„Meine antisowjetische Tätigkeit...": Russische Physiker unter Stalin. Von Gennady Gorelik. Vieweg, Braunschweig 1995.

Landau, the Physicist and the Man: Recollections of L.D. Landau. Herausgegeben von I.M. Chalatnikow. Pergamon Press, 1989.

Kapitza in Cambridge and Moscow: Life and Letters of a Russian Physicist. Herausgegeben von J.W. Boag, P.E. Rubinin und D. Shoenberg. North-Holland Publishers, 1990.

Matvei Petrovich Bronstein and Soviet Theoretical Physics in the Thirties. Von Gennady Gorelik und Viktor Ya. Frenkel. Birkhäuser, Basel und Boston 1994.

Stalin and the Bomb: The Soviet Union and Atomic Energy, 1939–1956. Von David Holloway. Yale University Press, 1994.

Intelligente Haustechnik

Eine sich weitgehend automatisch optimal regelnde Gebäudeausstattung soll künftig auch privaten Haushalten zugute kommen. Das Vernetzen von Geräten, Sensoren und Aktoren mit dezentralen Steuereinheiten kann den Komfort steigern, durch größere Effizienz sparen helfen,aber auch gänzlich neue Funktionen ermöglichen – von der Klimaanlage, die je nach Raumluftqualität anspringt, bis hin zu Alarmsystemen, die sich selbst scharf schalten, sobald die Bewohner das Haus verlassen.

Häusliche Automation mit *European Home Systems*

Von Ludwig Brackmann und J.-Uwe Varchmin

Kleinroboter, die kochen, den Tisch decken, nach dem Essen wieder abräumen und anschließend die Wohnung reinigen, gehören in Zukunftsromanen seit langem zur Ausstattung eines automatisierten Haushalts. Doch auch der zentrale Computer versieht in diesem Genre seinen Dienst, steuert Licht- und Kommunikationsanlagen und ist bemüht, unauffällig den Bewohnern das Leben so angenehm wie möglich zu gestalten.

Mittlerweile ist der zweite Ansatz technisch weitgehend umzusetzen. Als Heimautomatisierung bezeichnet man heutzutage die Vernetzung von elektrischen und elektronischen Komponenten und Geräten im privaten Haushalt – vom Thermostaten über das TV-Gerät bis zur Waschmaschine – mit geeigneter Kommunikationstechnik (die sogenannten Service-Roboter dürften sich später eventuell in das Gesamtkonzept einfügen). Vernetzt sollten sie sich effizienter nutzen lassen; der Wohnkomfort wird dadurch steigen, und Gefahren wie von einer eingeschalteten, aber vergessenen Herdplatte oder von Einbrechern sind wesentlich zu vermindern.

Standardisierung

Anders als bei den Zweckbauten von Behörden und Unternehmen läßt sich der Nutzen für Privatleute, die ihr Heim mit der neuen Technik aus- oder nachrüsten wollen, nur bedingt in Mark und Pfennig angeben: Sicherheit, Komfort und Prestige wird der einzelne unterschiedlich bemessen. Deshalb dürften Beträge, die er zu investieren bereit ist, vergleichsweise geringer sein.

Solchen Bedarf kann nur preiswerte Technik wecken und befriedigen. Des weiteren müssen Bewohner automatisierter Häuser ihr System auf einfache und zuverlässige Weise immer wieder gemäß aktuellen Bedürfnissen mit weiteren, eventuell fortschrittlicheren Komponenten neu konfigurieren oder kleinere Anlagen sogar ohne Fachmann installieren können. Damit der Kunde zwischen einer Vielzahl von Produkten wählen kann, sollte schließlich die grundlegende Kommunikationstechnik für alle Hersteller von Teil- und Komplettsystemen frei und damit kostengünstig verfügbar sein.

Diese Anforderungen berücksichtigt ein Industriestandard, den die in der European Home Systems Association (EHSA) organisierten Firmen mit Unterstützung der Europäischen Union entworfen haben. Sie wollen mit dieser Spezifikation die Einführung und Vermarktung entsprechender europäischer Produkte auf einer gemeinsamen Basis fördern, denn die Erfahrung zeigt, daß sich Märkte besser entwickeln, wenn der Nutzer nicht zwischen inkompatiblen Systemen wählen muß. Alle EHSA-Mitglieder erhalten eine Lizenz dafür. Außerdem benennt die Organisation Einrichtungen, die Produkte auf Einhaltung des Standards prüfen dürfen und Zertifikate erteilen. Es gibt bereits entsprechende Hard- und Software; und eine Reihe bedeutender Hersteller von sogenannter weißer Ware – also von Kühlschränken, Elektroherden, Waschmaschinen und dergleichen – sowie große Versorgungsunternehmen haben sich für EHS entschieden.

(Diese Einigkeit herrscht erst seit 1996, zuvor standen dem EHS zwei weitere Vorschläge von Firmenkonsortien gegenüber. Zudem existiert in den USA ein weiterer De-facto-Standard, das *local operating network* oder kurz LON, das auf einem Netzwerk von Neuron-Chips basiert; ein Schweizer Unternehmen bietet entsprechende Produkte auch auf dem europäischen Markt an. *Die Redaktion.*)

Datenwege im Heim

Für den Informationsaustausch zwischen Haushaltsgeräten, Sensoren, Steuerzentralen und Stellgliedern stehen laut der Spezifikation verschiedene Übertragungsmedien zur Verfügung: das Stromnetz der Energieversorgung, verdrillte Zweidrahtleitungen wie für Klingel und Telephondraht, Koaxialkabel sowie die Datenübertragung per Infrarot oder per Funk. Damit ist es möglich, alle Funktionsbereiche des privaten Haushalts wie Energie-, Gas- und Wasserversorgung, innere und äußere Sicherheit sowie Unterhaltung in einem einheitlichen System zusammenzufassen.

Man unterscheidet offene und geschlossene Übertragungsmedien. Erstere lassen sich leicht stören: Ein Mensch unterbricht die Strecke der Infrarot-Fernbedienung schon, wenn er sich in den Weg stellt; Elektrogeräte können den Daten-

austausch via Funk oder Stromnetz stören. Geschlossene Medien, die Informationen über Leitungen senden, verändern ihre Übertragungscharakteristik hingegen nur, wenn Komponenten an das Netz angeschlossen oder von ihm abgekoppelt werden.

Die unterschiedlichen Medien bieten je nach Einsatzbereich spezifische Vorteile. So erfordert die Kommunikation über das Stromnetz kein zusätzliches Datenkabel. Weiße-Ware-Geräte lassen sich zudem ohne Änderungen am Metallgehäuse und somit auch ohne Beeinflussung der vorhandenen elektromagnetischen Abschirmung vom Hersteller aufrüsten. Für mobile Fernbedienungen und Meldegeräte bieten sich Funk und Infrarot als Übertragungsweg an. Das Koaxialkabel wiederum läßt sich im Rahmen der EHS-Spezifikation zweifach nutzen: Zum einen kann man digitale Daten mit 9600 Bit pro Sekunde transferieren; im hochfrequenten Bereich der Radio- und Fernsehsender sind überdies gleichzeitig Audio- und Videosignale übertragbar, also beispielsweise das der Türklingel und das der Kamera, die den Eingangsbereich überwacht.

Der EHS-Standard berücksichtigt das OSI-Referenzmodell (*open systems interconnection*), eine international genormte Architektur für offene, das heißt herstellerunabhängige Kommunikation. Ungeachtet der jeweiligen Realisierung ordnet dieses Modell alle erforderlichen Teilprozesse insgesamt sieben aufeinander aufbauenden Funktionsschichten zu, die nach gewissen Regeln Informationen austauschen, wobei jeweils eine für die nächsthöhere bestimmte Dienste erbringt. Die Übertragungswege betreffen die beiden untersten Ebenen, nämlich die physikalische Realisierung und die Datenverbindungsschicht, in der zu übertragende Informationen in eine dem jeweiligen Medium gemäße Form gebracht werden.

Wird dazu etwa die Leitung des elektrischen Versorgungsnetzes genutzt, schreibt der EHS-Standard vor, die digitalen Daten per Frequenzmodulation umzusetzen und sie im sogenannten C-Band bei 125 bis 140 Kilohertz zu übertragen (Bild 1). Dazu steht ein Baustein der Firma SGS Thomson Microelectronics seit mehreren Jahren zur Verfügung. Die nächsthöhere Schicht ergänzt beispielsweise eine Dateneinheit von acht Bits um weitere fünf, die zur Fehlerkorrektur genutzt werden. Auf dieser Ebene sind auch die Regeln für den Zugriff auf das Netzwerk verankert; insbesondere muß

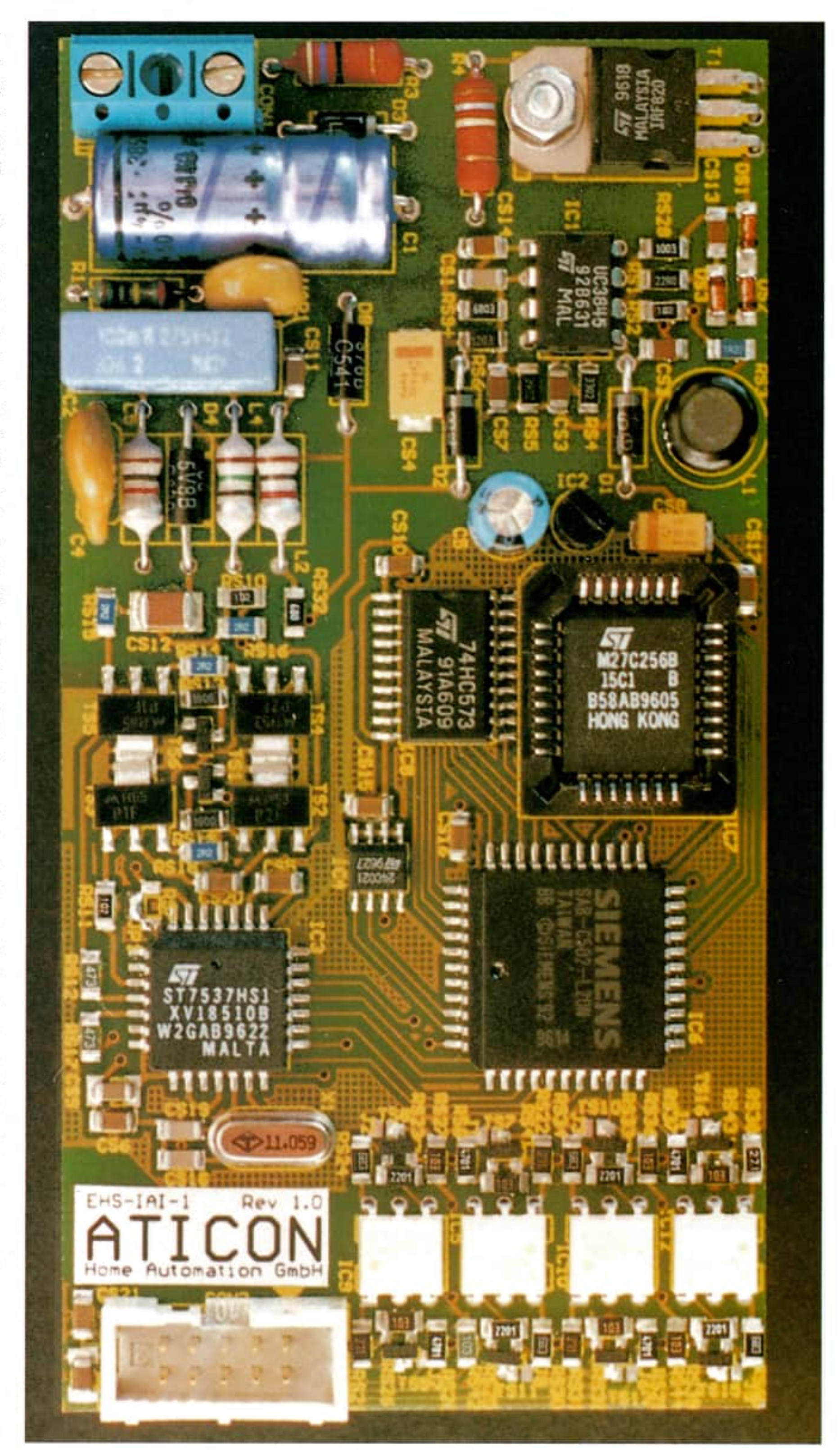


Bild 1: Einzelne Komponenten intelligenter Technik für Privathäuser sollten sich selbst dann zu einem System integrieren lassen, wenn sie von verschiedenen Herstellern und aus verschiedenen Produktgenerationen stammen. Dazu hat die European Home Systems Association (EHSA) einen Industriestandard entworfen. Damit lassen sich auch technische Anlagen nutzen, die in Wohngebäuden bereits installiert sind, zum Beispiel das Netz elektrischer Leitungen. Ein EHS-Knoten für die Kommunikation auf diesem Wege wird mit wenigen Komponenten klein und preiswert realisiert. Die 6 mal 12 Zentimeter große Platine der Firma Aticon enthält ein Modem, das digitale in analoge Signale wandelt, einen die Kommunikation überwachenden Protokoll-Prozessor, ein Schaltnetzteil zur Stromversorgung der Schaltung selbst sowie eine serielle Schnittstelle zum jeweils angesteuerten Hausgerät.

zuvor eine Mindestzeit ohne Kommunikation verstrichen sein, bevor eine andere Komponente das Medium für sich beanspruchen kann. Zudem darf eine Verbindung nicht länger als eine Sekunde dauern. So werden sich mehrere aktive oder zu aktivierende Geräte nicht gegenseitig behindern und kommen rasch an die Reihe.

Signaldämpfung und Störsignale auf einer Netzleitung können sich aber von einem Moment zum nächsten deutlich ändern. Beispielsweise erzeugt das An- und Abschalten elektrischer Verbrauchseinheiten kurzzeitige Spannungsspitzen, die einzelne Bits einer übertragenen Nachricht verfälschen können. Um das zu entdecken und darauf zu reagieren, versieht man die zu übertragenden Daten mit fehlererkennenden und -korrigierenden Codes.

Schwieriger sind länger andauernde Fremdsignale oder Dämpfungen zu beherrschen, wie elektrische Geräte sie mitunter hervorrufen. So setzt eine Elektroheizung die wenigen Watt Sendeleistung eines Netzknotens ebenso in Wärme um wie die ein bis zwei Kilowatt des normalen Stromnetzes; derartige Effekte können die Kommunikation auch für längere Zeit erschweren. Um solche Phänomene in bestehenden Anlagen zu untersuchen, wurde am Institut für Elektrische Meßtechnik der Technischen Universität Braunschweig ein Analysegerät entwickelt, mit dem sich unter anderem zwei oder zehn Tage lang messen läßt. Damit kann man typische Nutzungszeiten im Tages- und Wochenrhythmus erfassen und so die Eignung des Stromnetzes als Übertragungsmedium im jeweiligen Gebäude beurteilen (Bild 2); innerhalb einer Wohnung funktioniert die Kommunikation nach bisherigen Untersuchungen zuverlässig.

Eine Zweidrahtleitung, ein sogenanntes Twisted Pair, kann man auf zweierlei Weise einsetzen. Beim Schema TP0 fließen Daten und Versorgungsleistung der Netzknoten – also der elektronischen Einheiten, die der Datenweiterleitung dienen – auf einem gemeinsamen Adernpaar. Dabei wird das den logischen Zustand null repräsentierende Bit durch die Versorgungsspannung und das eins codierende durch ein Kurzschließen der beiden Leitungen dargestellt. Entsprechend wenig Strom, nämlich nur etwa ein halbes Milliampere, darf fließen; die Datenrate beträgt 4800 Bit pro Sekunde. Bei der Alternative TP1 braucht man zwei Adernpaare, eines für die Datenübertragung und das andere für die elektrische Versorgung der Knoten. Eine logische Null wird hier abwechselnd als positive oder negative Spannungsdifferenz zwischen den beiden Datenadern, eine Eins durch den Wert null codiert. Das Verfahren ist somit weniger störanfällig. Die maximale Reichweite beträgt laut EHS-Spezifikation 1200 Meter und die Datenrate 9600 Bit pro Sekunde.

Der Zugriff auf den Bus (in der Elektrotechnik die Gesamtheit aus Hard- und Software eines Kommunikationssystems) ist so organisiert, daß mehrere Teilnehmer gleichzeitig versuchen dürfen, darauf zuzugreifen. Freilich hat nur einer dabei Erfolg, doch gehen die Daten der anderen nicht verloren, sondern konkurrieren in der nächsten Runde um die Weiterleitung.

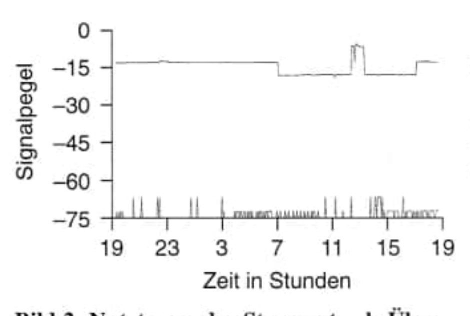
Für das Übertragungsmedium Funk entwickelt eine Arbeitsgruppe der EHSA und der European Installation Bus Association unter Federführung von Bosch Telekom einen gemeinsamen neuen Standard, der nach Fertigstellung als europäische Norm eingereicht werden soll. Weil der derzeit freigegebene Frequenzbereich um 433 Megahertz bereits stark ausgelastet ist, soll dafür ein neues Frequenzband bei 860 Megahertz beantragt werden.

Strukturelle Gliederung

Ein EHS-Netzwerk wird in Abschnitte unterteilt, in denen jeweils bis zu 158 Geräte adressiert werden können, die dasselbe Übertragungsmedium nutzen (Adressen identifizieren die verschiedenen Einheiten im Netz und ermöglichen ihnen somit erst, Nachrichten und Daten auszutauschen). Solche Subnets lassen sich logisch durch sogenannte Router verknüpfen. So vermag man ein komplexes Haus-Netzwerk aus mehreren Teilsystemen aufzubauen, die intern mittels unterschiedlicher Medien kommunizieren. Die Zahl möglicher Adressen wird durch einen Router um jeweils 256 erweitert; in aufsteigender Folge lassen sich sieben davon hintereinanderschachteln und somit bis zu 2×10^{19} Elemente anwählen, was sicherlich auch in einigen Jahrzehnten noch ausreichen dürfte. Die Aufteilung in Abschnitte bietet zudem den Vorteil, daß Nachrichten an Geräte in ihrem eigenen Subnet eine kürzere Adreßinformation benötigen und die kleineren Datenpakete schneller auszutauschen sind.

Die gesamte technische Ausstattung eines Haushalts läßt sich nach dem EHS-Standard so auf das Netzwerk abbilden, daß verschiedene Anwendungsbereiche eigene Steuerzentralen (*feature controller*) haben, die parallel zueinander arbeiten können; man spricht von einer Multimaster-Architektur. Jede Zentrale nimmt Informationen auf, verarbeitet sie und trifft daraufhin Entscheidungen. Zugeordnet sind ihr *complex devices* genannte periphere Einheiten wie Sensoren oder Aktoren, die lediglich Daten abgeben oder Anweisungen empfangen.

Dieses Konzept ermöglicht einen modularen Aufbau des Gesamtsystems, wobei auch unterschiedliche Wünsche der Nutzer berücksichtigt werden können. So braucht man sein Haus nicht gleich komplett zu automatisieren, sondern kann beispielsweise ein System mit einem Übertragungsmodus für eine Anwendung installieren, etwa um das Gebäude zu sichern, um Küche und Wohnbereich mit mehr Bedienungskomfort auszustatten, um ressourcenschonender zu wirtschaften oder einfach um die Haushaltskasse zu entlasten. Eine solche Erstausstattung läßt sich dann jederzeit durch weitere Komponenten oder Subnets ergänzen.



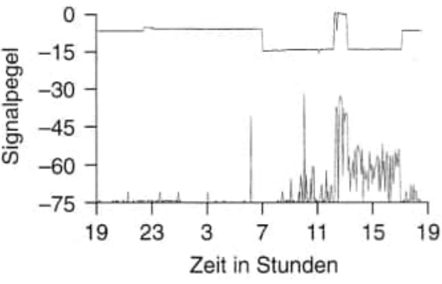


Bild 2: Nutzt man das Stromnetz als Übertragungsmedium für den Datentransport, werden die Signale unter Umständen durch die Stromentnahme elektrischer Verbraucher gedämpft (oben) beziehungsweise durch Spannungsschwankungen gestört (unten). Aufgezeichnet wurden die Signalverläufe über 24 Stunden bei der Kommunikation zwischen zwei benachbarten Büroräumen. Jeweils oben erkennt man, daß der Signalpegel während der Geschäftszeiten gedämpft wurde. Je nach Meßort – hier zwei Beispiele – war der Fremdsignalpegel unterschiedlich hoch; der Abstand zum Nutzsignal blieb jedoch stets groß genug für die Datenübertragung.





Bild 3: Das Hauptmenü einer Fernseh-Bedienoberfläche (links), entwickelt an der Technischen Universität Braunschweig, zeigt verschiedene Anwendungen innerhalb eines Automationssystems für private Haushalte. Mit einer Infrarot-Fernbedienung lassen sich die Menüpunkte anwählen. Man gelangt dabei in Untermenüs, wo Gerätezustände angezeigt und Schaltfunktionen aktiviert werden können, wie der Ausschnitt – Steuerung einer Waschmaschine etwa vom Schlafzimmer aus – illustriert (rechts). Wichtige Informationen wie beispielsweise Warnungen vor Defekten werden automatisch in das laufende TV-Programm eingeblendet.

Einfache Installation

Eine Stereoanlage stöpselt man nach Anleitung zusammen, verbindet den Radioteil mit der Antennenbuchse, schließt das Ganze an die Steckdose an und stellt nach Inbetriebnahme die Sender ein. Intelligente Haustechnik sollte nicht schwieriger in Gang zu setzen sein; dafür muß sie aber vorab mit ausgeklügelten Funktionen versehen werden. EHS bietet dafür die Funktionen *registration* zur automatischen Adreßvergabe und *enrolment* (im umgangssprachlichen Englisch gleichbedeutend mit Eintragung oder Anheuerung) zum selbständigen Aufbau logischer Verbindungen zwischen Steuerzentralen und Peripherie – ein Schlüsselprozeß, der in der Automatisierungstechnik einzigartig ist.

Das automatische Registrieren bedingt, daß eine spezielle Systemeinheit die Adressenliste eines Abschnitts verwaltet. Insbesondere Hausgeräte wie Waschautomaten, die einmal in das System aufgenommen werden und dann längere Zeit darin verbleiben, haben einen nichtflüchtigen Speicher für die zugewiesene Adresse. Bei einem solchen Gerät löst der Benutzer die Registrierung per Knopfdruck aus, und das Gerät erhält einen Adreßeintrag in der Liste. Andere EHS-Geräte erfragen – wiederum selbsttätig – ihre Subnet-Adresse jedesmal nach dem Einschalten.

Für Netze ohne eigene Adressenverwaltung eignet sich ein weiteres Verfahren. Dabei sendet das sich registrierende Gerät so lange Test-Nachrichten mit zufälligen Adressen aus, bis es keine Antwort mehr erhält; die letzte, noch nicht vergebene Adresse weist es sich selbst zu und speichert sie flüchtig oder nichtflüchtig. Schließlich gibt es auch Geräte, deren Adressen bereits voreingestellt sind oder die eine automatische Registrierung nicht unterstützen; dann muß allerdings ein Installateur das Subnet richtig organisieren.

Nach der Registrierung können die einzelnen steuernden und peripheren Einheiten zwar schon miteinander kommunizieren, doch ist ihnen noch unbekannt, in welcher Funktion sie mit welchen anderen Geräten zusammenarbeiten sollen. Das *enrolment* ermöglicht nun, die Funktionen aller angeschlossenen Einheiten automatisch zu erfassen. Es richtet dabei Applikationsverbindungen auch zwischen Komponenten verschiedener Hersteller ein. Dafür wird zunächst eine spezielle Tabelle in jeder Einheit angelegt. *Complex devices* verfügen über eine Art Karteikarten, in denen verfügbare Funktionen beschrieben sind. Diese Daten werden von den *feature controllers* gelesen und mit den Angaben zu ihren jeweiligen Applikationen verglichen. Bei Übereinstimmung wird eine Verbindung in die Tabelle eingetragen.

Neue Komponenten lassen sich so auf einfache Weise integrieren. Beispielsweise kann ein Heizungssystem mit Temperatursensoren, Ventilen, Raumthermostaten, Fensterkontakten und einer Heizungs-Steuerzentrale schon vorhanden sein, und der Hausbesitzer will es um ein Alarmsystem eines anderen Herstellers erweitern. Während des *enrolments* findet nun der neue *feature controller* auch die Fensterkontakte des Heizungssystems und integriert sie in seine Sicherheitsabfragen. Dies erfordert keinerlei Zutun eines Technikers oder Installateurs.

Bedienung am Fernsehgerät

So einfach wie zu installieren sollte ein System zur Hausautomatisierung auch zu bedienen sein. Dazu gibt es vielerlei Möglichkeiten, vom einfachen Taster mit Leuchtdioden, die bei bestimmten Funktionen aufleuchten, bis zur mobilen Multi-Fernbedienung für den gesamten Haushalt. Als Kontroll- und Kommandozentrale kann ferner ein Personal Computer dienen. Besonders erfolgreich am Markt dürften Bedienoberflächen werden, die sich auf dem normalen Fernsehbildschirm mit Infrarot-Fernbedienung abrufen lassen. So ist eine am Institut für Elektrische Meßtechnik der Technischen Universität Braunschweig in Zusammenarbeit mit der Firma Aticon entwickelte Schnittstelle auf intuitive Bedienung ausgelegt (Bild 3). Der Hausbewohner kann sich mit speziellen Menüs über den Zustand des Systems informieren oder Änderungen vornehmen, aber auch Informationen in das laufende TV-Programm einblenden lassen. Die Anordnung der einzelnen Bedienelemente ist an die Zifferntastatur einer TV-Fernbedienung angelehnt, was das Erlernen und den Umgang vereinfacht. Zugrunde liegt eine Elektronik, die sich an die SCART-Buchse jedes handelsüblichen Fernsehgeräts anschließen läßt; künftig wird wohl eine solche Bau-

gruppe gleich in das Fernsehgerät mit eingebaut.

Hausgeräte, Sensoren und Aktoren kann man damit überwachen und fernsteuern. Außergewöhnliche Meldungen – etwa Warnungen über Fehlfunktionen – werden in das laufende TV-Programm eingeblendet; ist der Fernseher auf Stand-by geschaltet, wird er dann eigens aktiviert. Als Übertragungsmedium dient das Stromnetz, so daß auch ein tragbares TV-Gerät in jedem beliebigen Zimmer als Nutzer-Schnittstelle dienen kann.

Die ersten Hausgeräte, die serienmäßig mit EHS-Komponenten ausgestattet sind, bietet der spanische Elektrokonzern Fagor an; sie dienen vor allem höherer Sicherheit innerhalb der Wohnung und der Senkung der Stromkosten, indem günstige Tarife genutzt werden. Zentrale Einheit des Systems ist ein elektronischer Anrufbeantworter, der gleichzeitig als Steuerzentrale und Verbindung zur Außenwelt dient; des weiteren können Heizung, Waschautomat und Gefrierschrank angeschlossen werden. Die einzelnen Geräte lassen sich per Telephon (oder per Sprachmenü vor Ort) programmieren, starten und stoppen. Zusätzlich anzuschließende Gas- und Wassersensoren erkennen Leckagen, und Stellventile begrenzen dann den Schaden. Bei wachsender Zahl der Hersteller, die den EHS-Standard unterstützen und neue Anwendungen wie die Datenfernabfrage entwickeln, dürfte sich diese neue Technik bereits in den nächsten Jahren durchsetzen.

Prof. Dr.-Ing. Varchmin studierte Nachrichtentechnik und promovierte 1978 nach einigen Jahren Industrieforschung an der Technischen Universität Braunschweig. Er wurde im selben Jahr an die Fachhochschule Hannover berufen, wo er bis 1983 das Institut für Elektrische Meßtechnik aufbaute. Dann erhielt er einen Ruf an das Institut für Elektrische Meßtechnik und Grundlagen der Elektrotechnik der Technischen Universität Braunschweig; dort befaßt er sich mit Kommunikationssystemen für die Automatisierungstechnik.
Diplom-Ingenieur Brackmann studierte an dieser Hochschule Elektrotechnik und wurde während der Diplomarbeit von Prof. Varchmin betreut. Er ist nun Geschäftsführer der Firma Aticon Home Automation in Braunschweig und an der Standardisierung von Haustechniksystemen auf europäischer Ebene beteiligt.

Integrierte Haustechnik aus volkswirtschaftlicher Sicht

Von Thomas Heimer

Wohl jeder hat sich schon einmal nach Verlassen der Wohnung die bange Frage gestellt, ob Bügeleisen und Herd auch wirklich ausgeschaltet und alle Fenster geschlossen seien; so manche Familie ist auf der Fahrt in den Urlaub noch einmal umgekehrt, um nach dem Rechten zu sehen, oder hat einen Nachbarn angerufen und darum gebeten. Systeme, die potentiell gefährliche Situationen im Privatbereich erkennen und den Bewohner rechtzeitig warnen – „Herdplatte glüht“ oder „Terrassentür steht offen“ – sind bislang nur ansatzweise verfügbar.

Seit den achtziger Jahre werden jedoch weltweit Konzepte für weitgehend automatische Geräte und Anlagen entwickelt, die ebendort die Sicherheit und überdies den Komfort erhöhen sollen. Dabei bildeten sich in Europa wie auch in Japan und den USA Forschungsverbünde, die vielfältige technische Voraussetzungen für sogenannte intelligente Häuser schaffen wollen (unter intelligenten Systemen versteht man solche, die bestimmte Situationen erfassen und auf deren Änderungen selbständig reagieren können).

Die Ergebnisse dieser Kooperationen wurden in dem von der Deutschen Forschungsgemeinschaft geförderten Projekt „Entwicklungslinien in der Haushaltstechnik“ an der Universität Frankfurt am Main untersucht. Auf dieser Grundlage erörtere ich im folgenden die Anforderungen aus der Sicht verschiedener Gruppierungen.

Interessen der Industrie

In Anlehnung an das vorherrschende Verständnis des Begriffs verstehe ich unter intelligenter – oder besser integrierter – Haustechnik eine Technologie für private Wohngebäude und auch für kleinere Zweckgebäude, die sich durch folgende Merkmale auszeichnet:

– Sie ermöglicht und regelt die Kommunikation unter zuvor unabhängigen Geräten und Systemen, so daß ihre Funktionen integriert sowie in ihrer Gesamtheit kontrolliert und gesteuert werden können.

– Dazu verwendet man mikroelektronische und mikrosystemtechnische Komponenten.

– Der Austausch von Daten zwischen ihnen muß standardisiert sein.

– Das System ist programmierbar und sollte zumindest teilweise lernfähig sein.

Aufgrund dieser Merkmale kann man jede technische Lösung danach bewerten, welches Bussystem sie verwendet, also welche aus Hard- und Protokollsoftware bestehende Netztechnologie, und welche Anwendungen sie ermöglicht. Diese Aspekte sind ungefähr vergleichbar mit der aus der Computerwelt bekannten Aufteilung in Hardware und Protokollstandard (einem Teil des Betriebssystems) einerseits und Anwendungsprogrammen wie etwa zur Textverarbeitung andererseits.

Erstaunlicherweise behindern bislang weniger technische Schwierigkeiten die Entwicklung als vielmehr, daß die beteiligten Unternehmen und Institutionen sich noch nicht auf einen gemeinsamen Protokollstandard zu einigen vermochten. Von dessen Ausgestaltung hängt unter anderem ab, welche Übertragungsmedien – beispielsweise Kabel oder Infrarotwellen – für den Informationsaustausch genutzt werden können, welche Prozessoren man für die intelligenten Einheiten benötigt und mit welcher Geschwindigkeit die Daten transportiert werden. Auch hier läßt sich eine Parallele zur Computerindustrie ziehen, die lange um den angeblich besten Betriebssystemstandard gerungen hat – mit allen Nachteilen für die Kunden.

Diese Querelen rühren von ökonomischen Strategien her. Grundsätzlich gilt: Je größer das Potential eines Systems, desto teurer wird es für die Endkunden; eine erfolgreiche Vermarktung ist aber nur bei geringen Entwicklungs- und Produktionskosten und entsprechend günstigem Preis-Leistungs-Verhältnis gewährleistet. Deshalb neigen alle an der Protokollentwicklung beteiligten Unternehmen dazu, Beschränkungen nur in solchen Bereichen hinzunehmen, für die sie kaum Anwendungen bieten oder planen.

Beispielsweise sind bei der Lichtsteuerung überwiegend nur geringe Datenmengen und geringe Übertragungsgeschwindigkeiten erforderlich, große hingegen bei der Verknüpfung des Herdes mit einem elektronischen Kochbuch. Entsprechend unterschiedlich sind die Anforderungen an das Bussystem, die beispielsweise die Hersteller von Installationsartikeln und jene von weißer Ware gewährt wissen wollen: Die einen ver-



Das von der spanischen Firma Fagor angebotene System El Major-Domo verbindet die verschiedenen in einer Küche vorhandenen Elektrogeräte über ein Bussystem. Das ermöglicht auch, über eine Schnittstelle zur Energieversorgung die Stromkosten zu minimieren. So springt der Kühlschrank dann vor allem zu Zeiten niedriger Tarife an. Auf diese Weise sollen sich mehr als die Hälfte der Stromkosten sparen lassen. Voraussetzung für den wirtschaftlichen Erfolg ist, daß solche Technik im verborgenen wirkt.

langen intelligente Technik in Zwischensteckern, die anderen in den Endgeräten, also etwa Herden oder Waschmaschinen. Je nachdem fällt schließlich der Wertschöpfungsanteil der jeweiligen Produzenten größer oder geringer aus.

Private und professionelle Nutzer

Nur wenn die Erwartungen derjenigen erfüllt werden, die mit einer neuen Technik umgehen sollen, kann sie sich auf dem Markt durchsetzen und behaupten. Freilich sind auch diese keineswegs gleichartig. Die Nutzer von Zweckbauten stellen sich leichter auf Innovationen ein als die von privaten Wohngebäuden; und beide Gruppen sind auch in sich unterschiedlich dafür qualifiziert. Außerdem benötigen sie verschiedene Funktionen und haben abweichende Vorstellungen von deren Wirtschaftlichkeit.

In Bürogebäuden oder Fabrikationshallen wird es in der Regel einen ausgebildeten Leitwartenführer geben, der das gesamte intelligente System überwacht. Neue Geräte und Funktionen kann geschultes Personal zudem selbst installieren, die Anlage geändertem Bedarf anpassen, Probleme erkennen und gegebenenfalls auch lösen.

Von privaten Nutzern sind solche Kenntnisse nicht zu erwarten; selbst technisch Versierte dürften kaum bereit sein, sich in Bedienungshandbücher für intelligente Wohnungs- oder Eigenheimsysteme einzuarbeiten. Mithin

– ist die Nutzerschnittstelle so zu gestalten, daß auch Unkundige derartige Anlagen einfach bedienen können;

– müssen sich neue Anwendungen durch Einstecken von Zusatzgeräten ergeben, wozu allenfalls einige wenige Tasten zu bedienen oder voreingestellte Parameter auszuwählen wären (das ist bislang aber erst für simple Funktionen gelungen);

– müssen die Komponenten stabiler und fehlerfreundlicher gestaltet sein als solche für professionelle Kunden.

Dies stellt hohe Anforderungen sowohl an die Kommunikationsprotokoll- als auch an die Anwendungssoftware. Fehlerhafte Eingaben oder gar unsachgemäße Eingriffe müssen selbst von Laien wieder zu beheben sein und dürfen keinesfalls den Ausfall des Systems zur Folge haben. Andererseits darf der Nutzer aber nicht den Eindruck haben, er sei auf bestimmte vorgegebene Möglichkeiten festgelegt und quasi nicht Herr im eigenen Hause.

Das integrierte Management eines Zweckbaus hat demgegenüber klar definierte Ziele mit eindeutigen Bewertungskriterien. Intelligente Systeme müssen sich dort auszahlen, indem sie den Einsatz von Ressourcen etwa durch effizientere Steuerung von Licht-, Heiz- und Klimaanlagen optimieren, die innere und äußere Sicherheit – also den Schutz etwa gegen Brand beziehungsweise Einbruch – verbessern oder Leistungsabrechnung und Gerätewartung erleichtern.

Im privaten Wohnbereich ist all dies gleichfalls von Interesse; doch kommen weitere Bedürfnisse hinzu, und die Kriterien lassen sich nicht so scharf nach Kosten-Nutzen-Gesichtspunkten, also in Mark und Pfennig fassen. Beispielsweise sollen Beleuchtung und Heizung vor allem eine behagliche Atmosphäre schaffen. Alte und behinderte Menschen können von unkomplizierter technischer Unterstützung profitieren. Komfortsteigernde Neuerungen wie der kochbuchgesteuerte Herd oder solche mit reinem Unterhaltungswert wie Audio- und Video-Angebote über den Fernsehanschluß steigern zwar den Lebensstandard; doch ist ein Wert dafür kaum zu berechnen. All solche Einrichtungen müssen aber unmittelbar überzeugen und einfach zu

nutzen sein. Ideal ist die intelligente Technik, so aufwendig an umgesetzten Ideen sie sein mag, die man so gut wie gar nicht wahrnimmt (Bild).

Vermutlich sind überdies viele künftige Anwendungsfelder überhaupt noch nicht bekannt. Um so wichtiger ist es, diese Technologie zukunftsoffen zu gestalten, um Innovationen jederzeit einbinden zu können.

Entwicklungsperspektiven

So unterschiedlich wie die Bedürfnisse der Nutzergruppen sind auch ihre finanziellen Möglichkeiten. Für einen aufwendigen Büroneubau können die Anbieter intelligenter Haustechnik eine kundenorientierte komplette Ausstattung ausarbeiten. Im privaten Haushalt werden hingegen Geräte und Systeme meist nur nach und nach angeschafft; deshalb müssen auch Komponenten von Systemen unterschiedlicher Hersteller miteinander zu koppeln sein.

Auch bei der Installation haben kommerzielle Betreiber Vorteile. Zweckbauten werden in relativ kurzen Abständen renoviert, und das technisch-wirtschaftlich optimale Medium für den Datentransport zwischen den Einheiten eines intelligenten Haussystems – Klingel- oder Telephondraht – läßt sich dabei kostengünstig und umstandslos verlegen. Hingegen sind Ein- und Mehrfamilienhäuser, zumindest in Europa, durchweg solide gebaut, so daß Grundsanierungen erst nach Jahrzehnten erforderlich werden. Für das technische Nachrüsten setzt man deshalb vor allem auf bereits vorhandene Kabel, insbesondere auf das Stromnetz, oder auf kabellose Medien wie Funk und Infrarot. Sie alle stellen aber höhere Ansprüche an die Netztechnologie; gerade die Übertragung über Stromkabel ist mitunter sehr problematisch.

Derzeit ist des weiteren die Nachfrage nach solcher integrierter Haustechnik für den privaten Bereich noch gering. Kostensenkung durch Fertigung großer Serien bedarf aber einer kritischen Masse. Vorerst kann ein Kunde also kaum davon profitieren, daß sich bereits andere für ein System entschieden haben. Je eher sich die Unternehmen auf einen gemeinsamen Standard für das Netzprotokoll einigen und je mehr Hersteller häuslicher Anwendungen ihre Produkte danach ausrichten, desto attraktiver wird das Angebot und desto rascher dürfte der Markt wachsen. Deshalb wird nun ein gemeinsames europäisches Bussystem entwickelt, und die Industrie will dabei Anforderungen privater Nutzer verstärkt berücksichtigen. Bis Ende dieses Jahres soll ein entsprechender Entwurf beim Comité Européen de Normalisation Electrotechnique (CENELEC), der europäischen Standardisierungsorganisation für Elektrotechnik, vorliegen.

Dr. rer. pol. Heimer ist Volkswirt und promovierte 1992 über ökonomische Technikforschung an der Universität Frankfurt am Main. Nach Tätigkeiten in Forschung und Beratung leitete er 1995 die Abteilung Technologie und Ökonomie des VDI/VDE-Technologiezentrums Informationstechnik in Teltow und leitet dort seit 1996 die Abteilung Technologie und Innovation. Zudem hat er seit 1994 leitende Funktion im Projekt „Entwicklungslinien der Haushaltstechnologie“ der Deutschen Forschungsgemeinschaft und ist seit 1995 Mitglied des Beraterkreises „Intelligente Haussysteme – Ressourcenschonendes Wohnen“ der Fraunhofer-Gesellschaft.

Messen und Einstellen thermischer Behaglichkeit

Von Erhard Mayer

Ob in der eigenen Wohnung oder am Arbeitsplatz – ein Mensch sollte sich in einem Raum wohl fühlen. Verschiedene Normen bieten Architekten und Bauphysikern deshalb Methoden, das Raumklima so zu optimieren, daß keine Zugluft herrscht und die Temperatur den meisten Menschen angenehm ist. Doch in entsprechenden Untersuchungen waren bis zu 20 Prozent der Probanden damit nicht zufrieden, denn individuelle Abweichungen vom durchschnittlichen Kalt-Warm-Empfinden sowie Veränderungen dieser Wahrnehmung im Tagesverlauf bei derselben Person erschweren eine Standardisierung. Deshalb haben wir einen Sensor entwickelt, der – unter bestimmten Bedingungen – das thermische Empfinden von Menschen nachvollzieht und somit Klimaanlagen individuell regelbar macht.

Physiologische Grundlagen

Der warmblütige menschliche Organismus sucht eine gleichmäßige Temperatur von 36,5 bis 37 Grad Celsius in seinem Kern aufrechtzuhalten. Dazu muß er je nach Umgebungstemperatur einen stoffwechselbedingten Wärmeüberschuß nach außen abgeben oder diese Abgabe reduzieren und den Energieumsatz steigern; am wohlsten fühlt man sich – bekleidet – gemeinhin bei einer Raumtemperatur von 22 Grad. Die wichtigste Regelungsinstanz liegt im Hypothalamus, einer Struktur des Zwischenhirns (Spektrum der Wissenschaft, November 1978, Seite 68). Dort werden alle Reizsignale der körpereigenen Temperaturfühler ausgewertet und entsprechende Effektoren aktiviert.

Kälterezeptoren in der Haut ermöglichen, auf Umgebungsänderungen zu reagieren, bevor die Kerntemperatur sinkt. Unbehagliche Kühle empfindet man im allgemeinen schon, wenn die Hauttemperatur etwa 34 Grad unterschreitet. Dann beginnt man zu zittern, und der Stoffwechsel wird erhöht, bis der Sollwert von etwa 37 Grad wieder erreicht ist; außerdem verengen sich die Blutgefäße der Haut und verringern somit den Wärmetransport zu dieser Austauschfläche. Steigt hingegen die Kerntemperatur an, erhöht sich auch die des Blutes, worauf die Wärmerezeptoren im Hypothalamus selbst ansprechen (bei Fieber werden sie zudem von im Blut kreisenden Abbaustoffen und Bakteriengiften gereizt). Zum Ausgleich sucht der Körper zusätzlich Energie durch Verdunstung und verstärkte Hautdurchblutung abzugeben: Man schwitzt merklich und bekommt einen roten Kopf.

Das objektive Kriterium thermischer Behaglichkeit ist demnach, daß weder Kaltrezeptoren der Haut noch Warmrezeptoren des Hypothalamus Anlaß geben dürfen, die Temperatur der Umgebung verändern zu wollen. Vereinfacht gesagt wäre das der Fall, wenn die Temperatur der Haut nicht unter etwa 34 und die des Stammhirns nicht über etwa 37 Grad Celsius liegt. Allerdings variieren diese Grenzen – wie erwähnt – zwischen Individuen und schwanken im Tagesverlauf, wobei das Wärmebedürfnis am frühen Morgen weniger ausgeprägt ist. Noch fehlen allerdings statistische Daten von Temperaturschwellenwerten, die

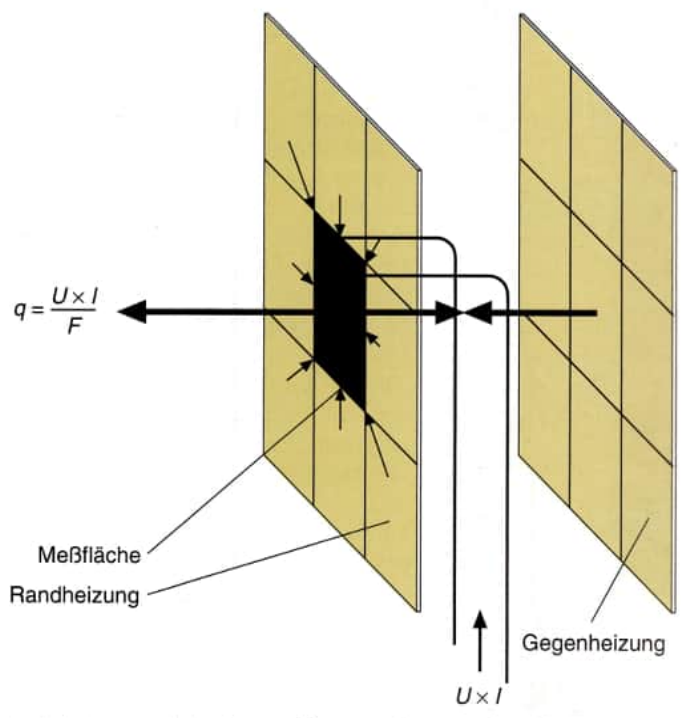
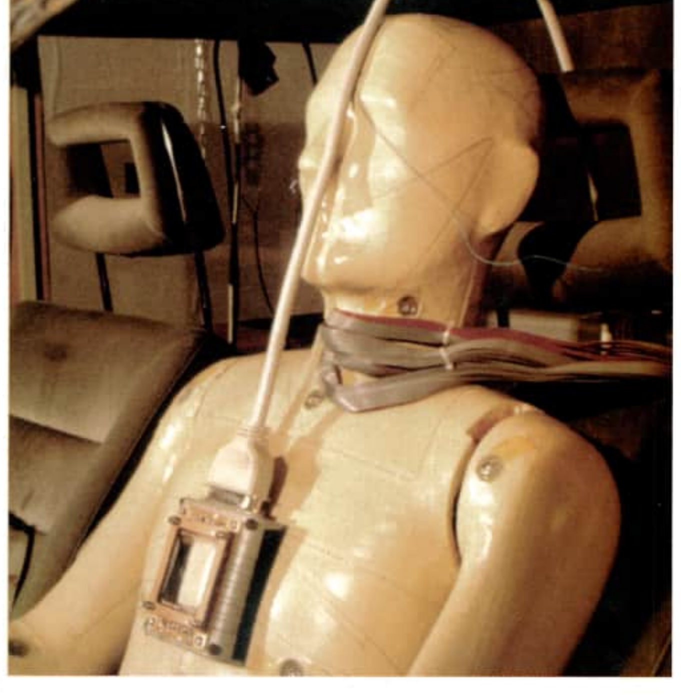


Bild 1: Schematische Darstellung des Sensors, der die Wärmeabgabe trockener Haut imitiert (links). Die Meßfläche wird konstant beheizt und gibt einen Wärmestrom ab, dessen Dichte *q* sich aus der Heizspannung *U*, dem Heizstrom *I* sowie der Flächengröße *F* berechnet. Durch zusätzliche seitliche und rückwärtige Heizfelder ist gewährleistet, daß die Wärme nur nach vorn abgegeben wird.



Der Anstrich der Meßfläche entspricht den Strahlungseigenschaften menschlicher Haut. Zum Sensor gehört auch ein Konvektionsmeter, das den gleichen Aufbau hat, aber wegen seiner blanken Oberfläche praktisch keine Strahlung aufnimmt oder abgibt. Klimauntersuchungen in Kraftfahrzeugen mit Versuchspersonen und dem System an einem Dummy dienten der Kalibrierung (rechts).

beispielsweise nach Geschlecht, Alter oder ethnischer Zugehörigkeit aufgeschlüsselt wären.

Der Sensor

Wie läßt sich nun eine Heizung oder Kühlung so regeln, daß sich ein Individuum in einem Raum nach dem genannten Kriterium wohl fühlt? Erforderlich ist eine Stellgröße, die als Klimasummenvariable den Einfluß der Umgebungsgrößen Temperatur sowie Bewegung und Feuchte der Luft, Temperatur der Umschließungsflächen und Sonneneinstrahlung erfaßt.

Sofern die Kerntemperatur nicht infolge zu hoher Raumtemperatur, körperlicher Arbeit oder zu dicker Kleidung steigt, kann thermische Unbehaglichkeit nur durch Kälteempfinden entstehen; unser Sensor imitiert deshalb die Wärmebilanz trockener, nicht schwitzender Haut. Die Summengröße (*resultant surface temperature*, RST) stellt sich auf der Oberfläche einer hautfarbenen Scheibe ein, die entsprechend der stoffwechselbedingten Wärmeproduktion elektrisch konstant beheizt wird (Bild 1 links). Neun um und hinter der quadratischen Meßfläche angeordnete Rand- und Gegenheizflächen gewährleisten einen vorwärtsgerichteten Wärmestrom, analog dem Temperaturgradienten zwischen wärmerer Haut und kühlerer Umgebung.

Das RST-Meter kann somit wie trokkene Haut Energie auf zweierlei Weisen abgeben: durch elektromagnetische Strahlung sowie durch Erwärmen der unmittelbar angrenzenden Luftschicht und damit verbundenen konvektiven Transport. Der Einfluß der Konvektion wird mit einem im Aufbau gleichen Gerät bestimmt, dessen Oberfläche allerdings blank poliert ist und deshalb praktisch elektromagnetische Strahlung weder aufnimmt noch abgibt. Führt man nun die Oberflächentemperatur derjenigen des RST-Meters nach, ergibt sich die Dichte des konvektiv abgegebenen Wärmestroms. Temperatur und Feuchte der Luft werden zusätzlich gemessen.

Damit steht der RST-Wert als Regelgröße für das Raumklima zur Verfügung. Sinkt er unter einen Schwellenwert, der sich aus Reihenuntersuchungen ergibt, wird entsprechend gegengesteuert. Weil die Wärmeabgabe durch Konvektion berechenbar ist, läßt sich auch der Einfluß eventueller Zugluft bestimmen.

Mögliche Anwendungen

Das Gerät wurde unter anderem in Kraftfahrzeugen getestet; die Behaglichkeitsbewertungen von etwa 100 Versuchspersonen ließen sich direkt mit den RST-Meßwerten in Zusammenhang bringen. Auf diese Weise kann man mit Hilfe von Dummys Automobile für die Insassen klimatisch angenehmer gestalten (Bild 1 rechts). Zudem dienen solche Reihenuntersuchungen der Kalibrierung.

Als weitere Anwendung wird derzeit an unserem Institut das Einstellen des Raumklimas am Büroarbeitsplatz entwickelt. Die vorgeschlagene Anlage stellt dazu eine konstante Lufttemperatur ein, variiert jedoch lokal die Wärmeeinstrahlung mit einer wasserdurchströmten Kühl-/Heizdecke von etwa fünf Quadratmetern Fläche, was bei unseren Annahmen der halben Grundfläche des Büros entspricht. Auf dem Schreibtisch steht der nach oben gerichtete Sensor. Ein Regler vergleicht den gemessenen Klimasummen- mit dem vom Nutzer vorgegebenen Sollwert und verstellt über ein Ventil den Wasserkreislauf der Kühl-/ Heizdecke dementsprechend (Bild 2).

Solche Sensoren können auch konventionelle Temperaturfühler zur Steuerung der Raumheizung in Wohnräumen ersetzen. Derzeit arbeiten wir daran, sie zu miniaturisieren und die Herstellungskosten zu verringern.

Schließlich lassen sich aus den Meßwerten, insbesondere dem konvektiven Wärmeübergang und der Luftfeuchte,

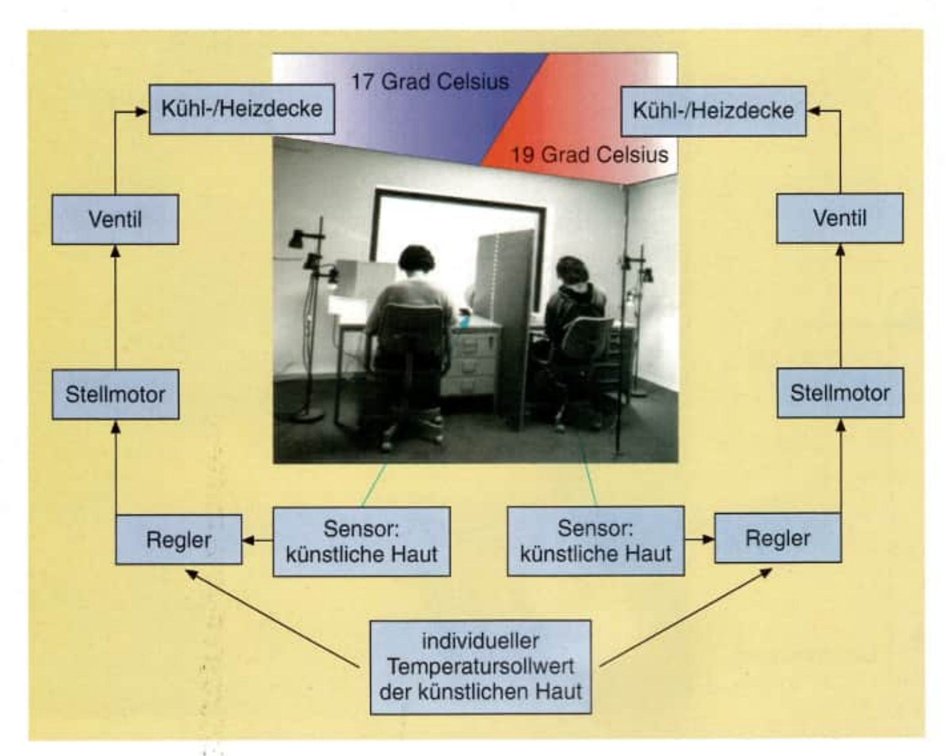


Bild 2: Das Raumklima in Büros läßt sich durch Infrarot-Strahlung individuell auch bei eng benachbarten Arbeitsplätzen anpassen. Dazu wird eine Kühl-/Heizdecke mit Regler und Stellventil für den Wasserkreislauf von den beschriebenen Sensoren gesteuert, die das thermische Empfinden der menschlichen Haut nachvollziehen.

der Hautbenetzungsgrad und damit die durch Schwitzen abgegebene Wärme berechnen. Dazu wird eine für die Stirn eines sitzenden und normal bekleideten Menschen typische Heizleistung von 95 Watt pro Quadratmeter eingestellt; die Klimasummengröße bezeichnen wir als *resultant forehead temperature* (RFT). Berücksichtigt wird des weiteren die beständige passive Verdunstung von Wasser durch die Haut, die wir mit typischerweise 18 Watt pro Quadratmeter ansetzen. Aus diesen Größen läßt sich der Wärmetransport beim Schwitzen je nach Umgebungsbedingungen und RFT-Wert ermitteln und in die Klimatisierung einbeziehen. Wird sie derart bedarfsgerecht reguliert, ist eine merkliche Energieeinsparung zu erwarten.

Dr. rer. nat. Mayer promovierte an der Technischen Universität München. Seit 1985 leitet er die Abteilung Raumklima des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik in Holzkirchen (Institutsleiter Karl Gertis), seit April ist er Lehrbeauftragter der Universität Stuttgart.

Ein geräteübergreifendes Steuerungssystem

Von Felix Schrimpf und Uli Doberer

Ein Leben ohne Elektrizität, ohne die zahlreichen Haushaltsgeräte und Medien der Unterhaltung, erscheint Menschen in Industrieländern höchstens als romantischer Traum vorstellbar. Gleichwohl ist die Geschichte der Stromnutzung in Privathäusern noch recht jung. Mit der ersten Dynamomaschine, die Werner von Siemens (1816 bis 1892) in Berlin 1866 baute, begann zunächst die Starkstromtechnik. Thomas Alva Edison (1847 bis 1931) setzte dann 1882 in New York das erste Elektrizitätswerk in Betrieb. Bereits um 1885 gab es Gleichstromanlagen mit brauchbaren Motoren für Gewerbe und Industrie, bald darauf auch Glühlampen sowie erste elektrische Heiz- und Kochgeräte. Aber die Elektrifizierung der privaten Haushalte ging doch ziemlich zögerlich vonstatten. Elektroherd, Kühlschrank, Staubsauger, Wasch- und Spülmaschine, Radio, Telephon und Fernsehen wurden in Deutschland erst nach dem Zweiten Weltkrieg allgemeiner Standard. Hinzu kamen inzwischen Home Computer, vielfältige Unterhaltungs- und Kommunikationselektronik, Klimaanlagen, elektrische Garagentor- und Rolladenantriebe, Einbruchmeldeanlagen und andere Sicherheitssysteme.

Der Wettbewerb unter den Herstellern sorgte für immer neue, dazu leistungsfähigere und preisgünstigere Geräte. Zunehmendes Umweltbewußtsein der Konsumenten bewirkte, daß der Energieverbrauch vieler Produkte verringert wurde. Im Zuge dieser Entwicklung erhielten sie aufwendige elektronische Steuerungen. Schon manche Waschmaschine oder Heizung hat ein gewisses Maß an technischer Intelligenz, kann also Sensordaten aufnehmen und verarbeiten.

Nachdem wohl kaum noch ein Bereich privaten Lebens ohne die Unterstützung durch elektrische Systeme auskommen muß, sucht man nun die bislang getrennten und für sich arbeitenden Anwendungen zu koppeln: Einzelne Geräte werden miteinander vernetzt, tauschen Informationen aus und stimmen ihre Funktionen aufeinander ab.

Voraussetzung dafür ist eine gemeinsame, einheitliche Schnittstelle. Dazu wurde in jüngster Zeit der Europäische Installationsbus (EIB) als Industriestandard für die Datenleitung und das Protokoll des Informationstransfers etabliert. Mehr als hundert europäische Hersteller bieten bereits über viertausend entsprechend ausgerüstete Produkte an. Ein Steuerungssystem aus unserem Hause, Domotik genannt, ermöglicht die Kontrolle aller EIB-vernetzten Geräte mit einer einheitlichen Bedienoberfläche, der HomeAssistant-Software (Bild 1). Welche Vorteile sich daraus ergeben, ist am besten an den folgenden beiden Beispielen zu erläutern.

Bedarfsgerechtes Heizen

Etwa drei Viertel des Energieverbrauchs privater Haushalte entfallen auf das Heizen. Am jährlichen Gesamtenergieverbrauch in der Bundesrepublik hat das einen Anteil von rund 20 Prozent. Maßnahmen zum optimierten Heizen helfen also nicht nur, die Haushaltskasse zu schonen, sondern verringern auch den Ausstoß schädlicher oder klimawirksamer Gase.

Nun muß jede neu installierte Heizung der Wärmeschutzverordnung genügen. Große Steigerungen des Wirkungsgrades sind mithin nicht mehr zu erwarten. Woran einiges zu tun bleibt ist das Verhalten der Hausbewohner – oder eben an Tech-





Bild 1: Der Europäische Installationsbus (EIB) ist ein Industriestandard, der die Kommunikation vernetzter elektrischer Hausgeräte verschiedener Hersteller regelt. Die Bedienung eines solchen Netzes muß auch Laien verständlich sein. Das erreicht man mit graphischen Oberflächen wie dem HomeAssistant (rechts).

nik, die sparsames Wirtschaften selber übernimmt. Daß man etwa beim Öffnen von Fenstern die Heizung in dem betreffenden Raum abstellen sollte ist zwar bekannt, wird aber selten befolgt. Herkömmliche Thermostatventile öffnen sogar den Zustrom warmen Wassers in den Heizkörper, wenn ihn kalte Luft umströmt. Von Vorteil wäre auch, wenn beispielsweise die Brennwerttherme einer Gasheizung nur so viel Wärme erzeugte, wie an den einzelnen Heizkörpern tatsächlich benötigt wird. Noch mehr Energie läßt sich sparen, wenn Räume nur beheizt werden, in denen sich überhaupt jemand aufhält.

Bei Domotik-Systemen sind deshalb Therme, elektrische Stellantriebe der Heizkörperventile und Temperaturregler in den einzelnen Räumen über den EIB miteinander und mit der Alarmanlage vernetzt. Diese erfährt von Magnetkontakten an den Fenstern, ob sie geschlossen sind. Derselbe Sensor kann das ohne zusätzliche Verkabelung auch dem Temperaturregler im Raum melden, der dann veranlaßt, daß das Heizkörperventil bis zum Erreichen einer Mindesttemperatur gedrosselt wird.

Die Gefahrenmeldeanlage wird in der Regel scharf geschaltet, wenn der letzte Bewohner das Haus verläßt. Dann läßt sich die Temperatur in allen oder in bestimmten Räumen senken. Zur vorgegebenen Uhrzeit oder wenn heimkehrende Bewohner die Alarmanlage inaktivieren, springt die Heizung wieder an. Die einzelnen Heizkörperventile melden der Therme zudem, wie weit sie geöffnet sind; daraus ermittelt sie direkt den wirklichen Bedarf an Wärme und erzeugt nicht mehr als erforderlich.

Die graphische Bedienoberfläche ermöglicht, an einer zentralen Stelle im Haus das Temperaturprofil für jeden Raum separat zu programmieren (Bild 2). So kann man für das Schlafzimmer behagliche Wärme beim morgendlichen Aufstehen vorgeben, es tagsüber und nachts dagegen kühl halten. Das Wohnzimmer wird nachmittags und abends auf ein komfortables Niveau, das Gästezimmer nur bei Bedarf geheizt. Trotzdem läßt sich die vorgegebene Raumtemperatur jederzeit über Regler an Ort und Stelle ändern.

Ohne Verzicht auf Komfort sind so bis zu 30 Prozent Energie einzusparen. Über ein Übertragungsgerät, wie es in vielen Alarmanlagen bereits vorhanden ist, kann man Domotik-Systeme überdies an das Telephonnetz anschließen, um sich aus der Ferne in die Heizungssteuerung einzuwählen, Informationen abzufragen oder zum Beispiel die Heizung einzuschalten, wenn man aus dem Winterurlaub heimfährt. Das Heizsystem kann aber auch von sich aus eine bestimmte

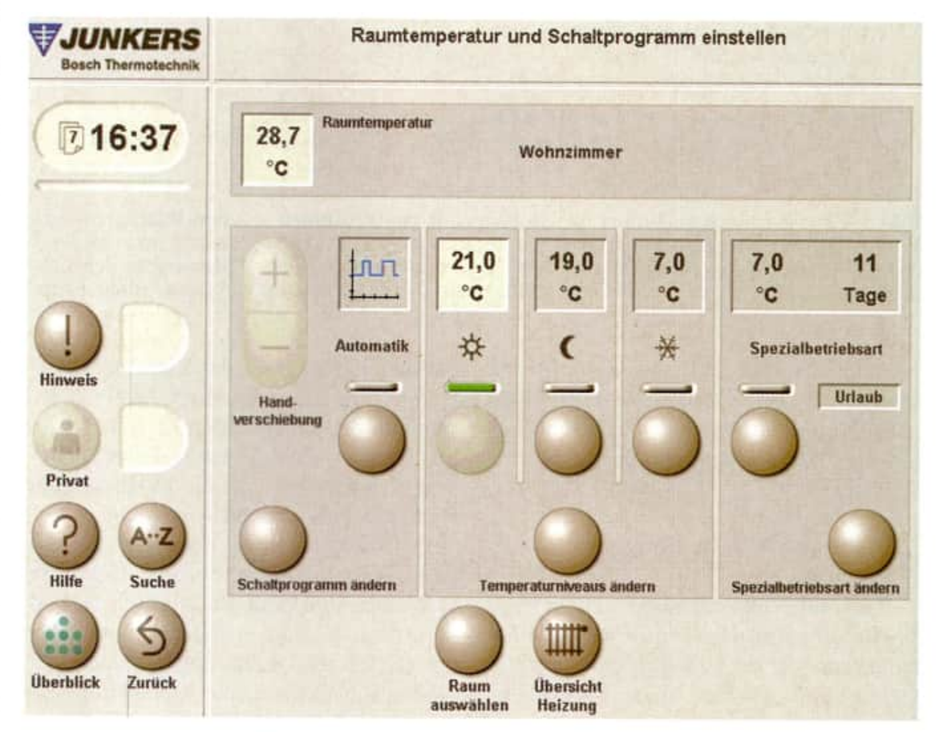


Bild 2: Viel Energie läßt sich im privaten Haushalt sparen, wenn Heizung und Heizkörper stets auf den tatsächlichen Bedarf eingestellt werden. So muß ein Wohnzimmer wohl nur ausnahmsweise in den Nachtstunden warm sein; allerdings sollte die Temperatur auch dann nicht unter einen bestimmten Mindestwert sinken. Solche Einstellungen kann man mit einer einfach zu bedienenden Benutzungsoberfläche vornehmen und damit auch Sonderfälle wie einen Urlaub programmieren.

	konventionell im Neubau in Mark	konventionell nachgerüstet in Mark	Europäischer Installationsbus im Neubau in Mark	Europäischer Installationsbus nachgerüstet in Mark
Licht schalten	3500	–	9500	–
elektrische Rolladenantriebe	5000	–	7000	–
Einzelraum-Temperaturregelung	3000	5000	4000	4500
Summe Licht, Rolladenantriebe, Einzelraumregelung	**11 500**	**13 500**	**20 500**	**21 000**
Erweiterung Licht um Zentralfunktionen	2000	5000	100	200
Erweiterung Licht um Steuerung über Bewegungsmelder	1500	3000	1000	1100
Erweiterung Licht um Anwesenheitssimulation	1500	3000	500	600
automatisch „Licht aus" beim Verlassen des Hauses	1500	3000	100	200
Summe Erweiterungen Licht	**6500**	**14 000**	**1700**	**2100**
Erweiterungen Rolladenantriebe um Zentralfunktionen	1500	3000	100	200
Erweiterungen Rolladenantriebe um zentrale Zeit- und Helligkeitssteuerung	2000	4000	800	900
Einbeziehen Rolladenantrieb in Anwesenheitssimulation	1000	2000	300	300
Summe Erweiterung Rolladenantriebe	**4500**	**9000**	**1200**	**1400**
Erweiterung Einzelraum-Temperaturregelung: Absenken beim Hausverlassen	2000	4000	100	150
Erweiterung Einzelraum-Temperaturregelung: Ventil zu bei offenem Fenster	1000	1800	200	200
Erweiterung Einzelraum-Temperaturregelung um Zentralfunktionen	1500	3000	200	200
Summe Erweiterung Einzelraum-Temperaturregelung	**4500**	**8800**	**500**	**550**
Netzfreischaltung Schlafzimmer	**500**	**1500**	**150**	**200**
Alarmanlage	10 000	16 000	11 000	12 000
Zustandsanzeige Fenster in Schlafzimmer, Küche, Eingangsflur	1000	2000	600	600
Erweiterung Alarmanlage: Licht an bei Alarm	3000	5000	300	300
Summe Alarmanlage und Erweiterungen	**14 000**	**23 000**	**11 900**	**12 900**
Summe Grundinstallation und Erweiterungen	**41 500**	**69 800**	**35 950**	**38 150**

Bild 3: Eine Vergleichsrechnung für ein Haus mit zwölf Räumen – Wohn-, Eß- und Schlafzimmer, zwei Kinderzimmern, Gäste- und Arbeitszimmer sowie Küche, Bad, Gäste-WC, Diele und Keller – und insgesamt 150 Quadratmeter Wohnfläche zeigt, daß Funktionen intelligenter Technik mit konventionellen Mitteln wesentlich teurer zu realisieren wären als auf Grundlage des EIB-Standards. Besonders deutlich fällt der Unterschied aus, wenn das jeweilige System nicht beim Neubau, sondern erst später installiert wird.

Nummer anrufen und eine Meldung abschicken, wenn die Wartung fällig oder eine Störung aufgetreten ist; so sind bei längerer Abwesenheit Folgeschäden zu vermeiden.

Zentrale Rolle der Alarmanlage

Weil eine Alarmanlage von vielen Meldestellen im Haus Informationen erhält, kann sie per EIB abfragen, welche Geräte eingeschaltet sind, gegebenenfalls das Ausschalten veranlassen und den aktuellen Zustand ebenso wie offene Fenster und Türen den Bewohnern auf Displays in allen Zimmern anzeigen. Zusätzliche Kabel sind dafür nicht erforderlich. Beim Verlassen des Hauses scharf geschaltet, löscht sie das Licht oder startet ein Programm, das durch An- und Abschalten der Beleuchtung in verschiedenen Räumen sowie – bei längerer Abwesenheit sinnvoll – durch Betätigen der Rolläden Anwesenheit vortäuscht.

Bei Einbruchalarm erleuchtet sie das ganze Haus, um ungebetene Gäste zu vertreiben und dem automatisch herbeigerufenen Wachdienst die Orientierung zu erleichtern. Löst ein Brandmelder Alarm aus, aktiviert die Anlage eine Panikbeleuchtung oder die Kennzeichnung der Fluchtwege. Diese Funktionen sind mit einer herkömmlichen, isoliert installierten Alarmanlage nur sehr aufwendig zu realisieren. Bei vernetzten Systemen steht die Information „Alarm" von vornherein allen Geräten – also auch der Beleuchtungssteuerung – zur Verfügung.

Systeme der integrierten Haustechnik bieten also mehr Komfort und Sicherheit. Insbesondere behinderten und älteren Menschen können sie – bei entsprechend einfacher und zuverlässiger Bedienbarkeit – das Leben erleichtern. Elektrische Geräte mit einer EIB-Schnittstelle kosten allerdings je nach technischem Aufwand und Funktionsumfang zwischen 50 und 300 Mark mehr als gewöhnliche. Das mag zwar als relativ teuer erscheinen, doch sind die Zusatzleistungen so wesentlich preiswerter zu erzielen als mit herkömmlicher Technik (Bild 3). Am günstigsten ist es, schon beim Bau eines Hauses oder bei

einer größeren Renovierung die Grundinstallation vorzusehen. Das System ist modular aufgebaut und flexibel; Änderungen und Erweiterungen erfordern mithin weniger Aufwand als herkömmliche Installationen.

Diplom-Ingenieur Schrimpf studierte Elektrotechnik an der Berufsakademie Stuttgart und war dann als beratender Ingenieur für Gebäudeautomation freiberuflich tätig. In dieser Zeit studierte er zudem Volkswirtschaft an der Universität Tübingen und der Universität Toronto (Kanada) und schloß 1995 ebenfalls mit dem Diplom ab. Seitdem arbeitet er im Marketing der Firma Bosch Telecom in Stuttgart, seit 1996 für den Bereich Domotik, wie das Unternehmen seine Produktlinie intelligenter Haustechnik nennt.
Dr. Doberer studierte an der Universität Stuttgart Physik mit den Schwerpunkten Festkörperphysik und Elektronik. Nach seiner Promotion war er in Raumfahrtprojekten tätig, zunächst bei der Firma ANT Nachrichtentechnik, dann bei Bosch Telecom, wo er seit 1991 die Abteilung Satellitenprojekte leitete; er übernahm dort 1996 die Leitung der Projektgruppe Domotik.

Intelligente Lichtversorgung in Zweckbauten

Von Jan de Boer

Im Zuge der Industrialisierung im 19. Jahrhundert wurde Fensterglas nicht nur in Massen hergestellt, Fortschritte in der Produktionstechnik erlaubten auch größere und kostengünstigere Scheiben. Große Fenster erhellten von da an lange die Innenräume, Grundrisse und Geschoßhöhen wurden darauf abgestimmt. Parallel dazu entwickelte sich das Bauen mit eisernen Skelettkonstruktionen, und es entstanden monumentale verglaste Ausstellungs-, Bahnhofs-, Fabrik- und Markthallen. Der Architekt L. Mies van der Rohe erhob gar die Trennung tragender und nichttragender Elemente zum Prinzip im Wohn- und Hochhausbau und schuf so die Grundlage für Gebäude mit großen Fensterflächen.

Allerdings vermag Tageslicht ohne weitere Hilfsmittel keine gleichbleibende Ausleuchtung zu gewährleisten, denn es ändert sich je nach Sonnenstand und Bewölkung. Zudem heizten sich die Räume hinter den Glasfassaden im Sommer stark auf, während im Winter zuviel Wärme dadurch verlorenging. Um die Jahrhundertwende begann jedoch auch die massenhafte Installation elektrischer Beleuchtung, die gerade am Arbeitsplatz von Vorteil schien. Rationelleres Bauen mit geringeren Geschoßhöhen und größeren Raumtiefen verstärkte fortan den Bedarf an Kunstlicht und umging dabei auch die klimatischen Probleme. Die ersten Leuchtstoffröhren, die auch Großraumbüros gleichmäßig auszuleuchten vermögen, kamen etwa 1936 auf und waren Mitte dieses Jahrhunderts verbreitet. Die bis in die siebziger Jahre gebauten Büros mit derartiger monotoner Ausleuchtung und ohne Sichtkontakt zur Außenwelt markieren einen traurigen Höhepunkt dieser Entwicklung.

Der Wunsch nach einer natürlicheren Arbeitsumgebung und die Notwendigkeit, Energie zu sparen, haben aber mittlerweile die Integration von Tageslicht in die Lichtplanung und in die Gebäudegesamtkonzeption wieder attraktiv gemacht. Heutige Beleuchtungssysteme kombinieren Kunst- und Tageslicht und berücksichtigen den Wärme- und Energiebedarf. Computergestützte Planungswerkzeuge erlauben, bereits in der Ent-

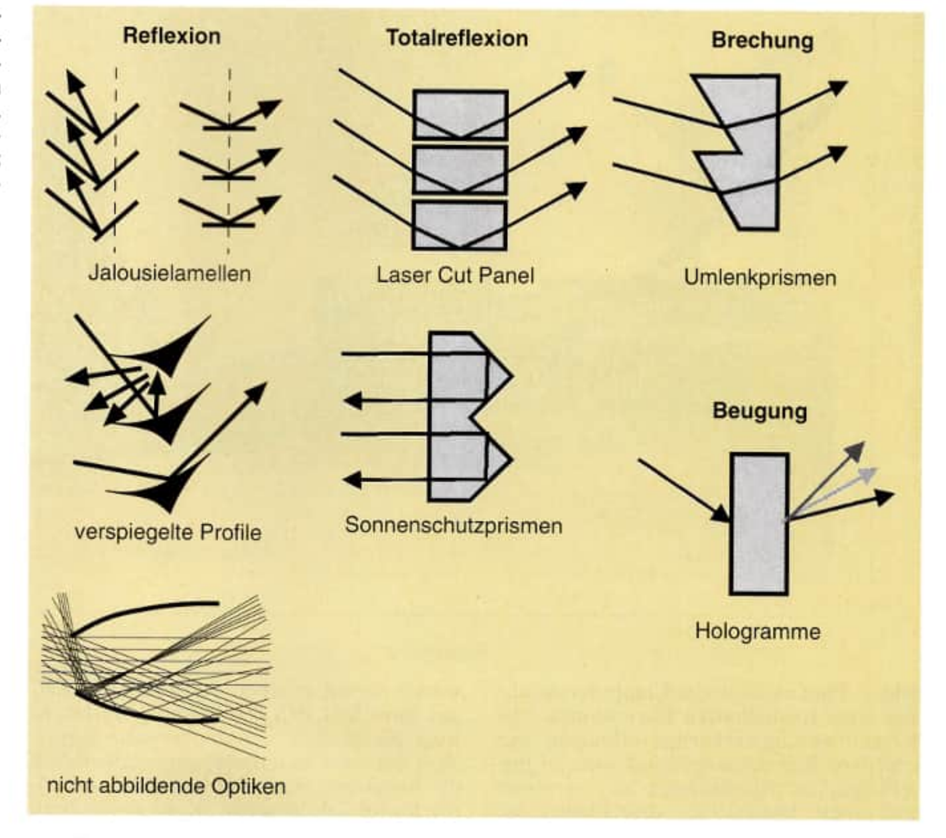


Bild 1: Zur Lichtlenkung und zum Sonnen- und Blendschutz können in die Gebäudefassaden verschiedenste Tageslichtsysteme integriert werden. Diese basieren auf einem von vier optischen Prinzipien. Jalousielamellen reflektieren Licht entweder zurück und dienen so als Sonnenschutz oder lenken es bei entsprechenden Neigungswinkeln in den Raum; ähnlich wirken starr in den Glasscheibenzwischenraum eingebrachte verspiegelte Profile. Speziell ausgelegte Reflektoren nehmen das Tageslicht bei großen Öffnungswinkeln außen auf und lenken es konzentriert bei schmaleren Austrittswinkeln in das Rauminnere; ein Beispiel dafür sind nicht abbildende optische Systeme. Am Übergang von optisch dichteren Materialien wie Acrylglas zu optisch dünneren wie Luft wird Licht total reflektiert. Darauf basieren zum Beispiel Laser Cut Panels: Mittels Lasern werden kleine Luftschlitze als optische Grenzschichten in Acrylglasscheiben gebrannt. Totalreflexion in Prismen schützt vor Blendung, denn nur diffuses Licht, nicht aber direkte Strahlung kann sie passieren. Prismen kann man auch zur Lichtlenkung nutzen, und durch unterschiedliche Schenkellängen sind die Umlenkwinkel an Fassaden und Raumgeometrien anzupassen. Hologramme vermögen den Lichtweg durch Beugung zu verändern; sie werden als dünne Filme hergestellt und lassen sich in Fenster integrieren.

wurfsphase das komplexe Zusammenwirken aller dieser Bereiche zu analysieren und zu optimieren.

Bauspezifische Lichtplanung

Bevor die Frage „Wie beleuchten?" beantwortet werden kann, sind die besonderen Anforderungen eines Gebäudes zu definieren. So werden im Wohnbereich und für repräsentative Zwecke atmosphärische Lichtstimmungen bevorzugt, während beispielsweise die Ausleuchtung von Verkaufsräumen den Blick auf die Produkte lenken soll. Für Museen ist außer guter Ausleuchtung der Exponate auf konservatorische Aspekte sowie auf eine gute Farbwiedergabe zu achten (wofür sich Tageslicht aufgrund seiner spektralen Zusammensetzung besonders eignet). In Zweckbauten wie Büros gilt es, die Konzentration auf die Sehaufgabe zu fördern und Bildschirmarbeitsplätze ergonomisch zu gestalten.

Lassen sich die Arbeitsplätze standardisieren, kann man auch meist die Anforderungen an die Beleuchtung leichter umsetzen. Weil Zweckbauten fast ausschließlich am Tage genutzt werden, läßt sich bei entsprechender Planung weitgehend auf permanente künstliche Beleuchtung verzichten.

Integrierte Beleuchtungssysteme

Bereits der Gebäudeentwurf entscheidet über eine ausreichende natürliche und energetisch sinnvolle Beleuchtung. Ausschlaggebend sind die Tiefe, Höhe und Orientierung der Räume. Des weiteren haben Verbauungen durch angrenzende Gebäudeteile sowie Größen und Positionen der Tageslichtöffnungen – Fenster oder Oberlichter beziehungsweise beides – maßgeblichen Einfluß. Lichthöfe spenden angrenzenden Räumen natürliches Licht von einer zweiten Seite.

In Räumen hinter konventionell verglasten Fassaden nimmt die Tageslichtintensität mit zunehmender Tiefe exponentiell ab, während in Fensternähe oft ein Überangebot zur Verfügung steht und bei direkter Sonneneinstrahlung extreme Helligkeitskontraste auftreten. Um einen Raum gleichmäßig und zur Gänze auszuleuchten sowie Blendung und übermäßige Wärmeeinträge zu vermeiden, sind verschiedene Systeme entwickelt worden, die auf unterschiedlichen optischen Prinzipien aufbauen (Bild 1).

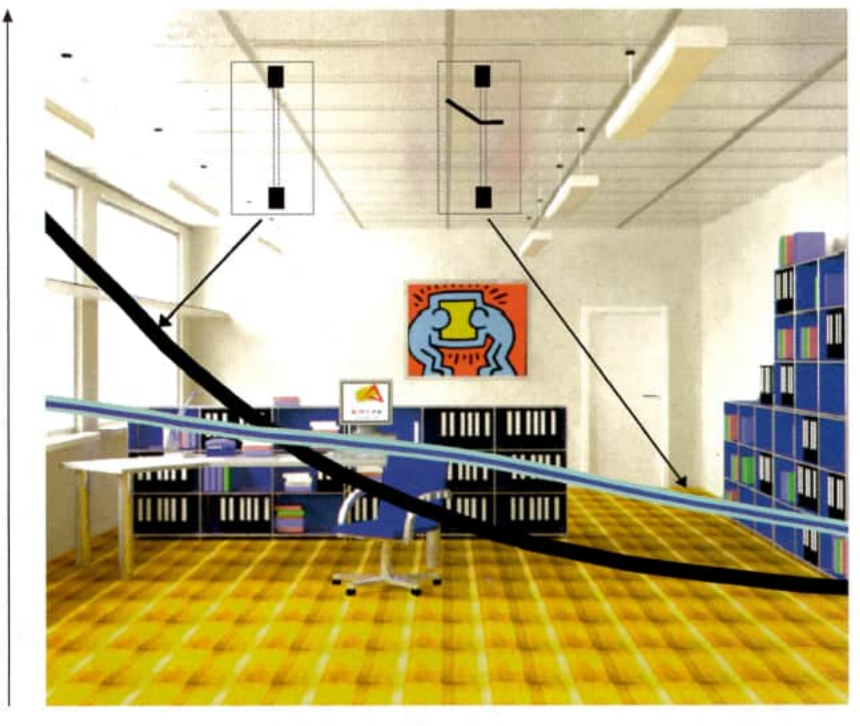


Bild 2: Photorealistische Computersimulation eines modellhaften Büroraumes. Moderne Planungswerkzeuge erlauben, verschiedene Beleuchtungssituationen zu modellieren, zu visualisieren, zu vermessen und auch hinsichtlich des Energieaufwands zu untersuchen. In dem dargestellten Büro läßt sich die Tageslichtausleuchtung bis in tiefere Raumbereiche gegenüber der einer Standardbürofassade durch die Kombination einer Lichtblende mit einer hochreflektierenden Decke verbessern.

Bei seitlich belichteten Räumen lenkt man das Tageslicht auf oft hochreflektierende Decken, die es auf die Arbeitsbereiche verteilen. Sogenannte heliostatische Anlagen bringen es mit Spiegeln vom Dach in daruntergelegene Geschoßebenen. Viele dieser Systeme muß man dem Gang der Sonne nachführen – sei es, daß dazu ihr Stand aus astronomischen Gleichungen zu jeder Tages- und Jahreszeit vorab berechnet wird, sei es, daß Photosensoren die Stelle höchster Leuchtdichte am Himmel bestimmen. Einige Fassadensysteme wie Blenden und Licht nur leitende, nichtabbildende Optiken heben auch bei bedecktem Himmel die natürliche Beleuchtung selbst in tieferen Raumbereichen.

Photosensoren aktivieren aber auch als Sonnenwächter Jalousien, wenn die Einstrahlung einen Schwellenwert überschreitet, beziehungsweise veranlassen das Wiederhochfahren der Blenden.

Über die Fassaden erhalten Innenräume bei intelligenter Planung ihre Grundbeleuchtung. Zusätzliches Kunstlicht ist tagsüber nur bei stark bedecktem Himmel beziehungsweise in den dunkleren Jahreszeiten erforderlich. Gebäudeelektronik steuert eine Beleuchtungsanlage mittlerweile effizienter und wirtschaftlicher, als es das übliche manuelle Betätigen des Lichtschalters vermag. Photosensoren messen dazu die Beleuchtung an einem oder mehreren Punkten im Raum (oder, ausgerichtet auf die Fenster, direkt die eintretende Lichtmenge), und eine Regelung schaltet stufenweise oder bei dimmbaren Leuchten kontinuierlich Kunstlicht hinzu. Über Sensoren im Außenbereich können die Sonnenschutz- und Lichtlenksysteme der Fassade miteinbezogen werden.

Sicherlich die einfachste und preisgünstigste Realisierung sind Kunstlichtregelungen, die unabhängig arbeiten. Bei nicht privat genutzten Bauten – und künftig wohl auch im Eigenheim – wird die Beleuchtungsanlage aber mehr und mehr auch in die Gebäudesystemtechnik integriert. Sogenannte Elektroinstallationsbussysteme – Netze von informationsverarbeitenden Einheiten, Sensoren und Aktoren – übernehmen dabei dezentral Steuer- und Regelfunktionen. Die Daten aller daran angeschlossenen Geräte stehen den Busteilnehmern zur Verfügung und können verknüpft werden, so daß man eine Beleuchtungssteuerung leicht etwa um Anwesenheitssensoren und Zeitschaltuhren erweitern sowie mit Sonnen- und Blendschutz, Heizung und Kühlung kombinieren kann. Bei einer von unserem Institut mitbetreuten

Schulsanierung sorgt ein solches System beispielsweise dafür, daß das Kunstlicht in den Klassenzimmern bei ausreichendem Tageslicht ausgeschaltet bleibt und erst bei mangelnder Beleuchtung kontinuierlich bis zum Sollwert hochgeregelt wird. Sonnenwächter steuern die Jalousien der Fassadenseiten separat.

Einsparungen

Anlagen wie die im obigen Beispiel genannte sind freilich noch nicht die Regel. Dazu tragen die noch hohen Investitionskosten ebenso bei wie unterschiedliche Bussysteme verschiedener Hersteller und die noch nicht vollständig beherrschte Störanfälligkeit. Doch ob im Systemverbund oder mit autonomer Elektronik, der Stromverbrauch für Beleuchtung kann in einem normalen Büroraum durch geregelten Betrieb um mehr als die Hälfte gegenüber dem bei manuellem Schalten gesenkt werden; berücksichtigt man auch den Energieverbrauch für Heizung beziehungsweise Kühlung, verringert sich der Gesamtaufwand um 20 bis 30 Prozent. Weil etwa dreimal mehr Kohlendioxid zur Stromerzeugung freigesetzt wird als bei der Verbrennung von Gas und Öl zu Heizungszwecken, leisten Einsparungen für künstliche Beleuchtung einen wichtigen Beitrag zur Senkung der CO_2-Emission.

Auf keinen Fall sollte man die von Kunstlichtquellen erzeugte Wärme – konventionelle Büroleuchten bringen drei- bis zehnmal mehr Energie in die Räume ein als die Sonne – als Zusatzheizung verstehen. Lichttechnik im intelligent geplanten Gebäude muß vielmehr Licht auch als Wärmequelle und Energieverbraucher auffassen und danach trachten, Einschaltzeiten künstlicher Quellen so kurz wie möglich zu halten. Im Winter sollte so viel Solarstrahlung wie möglich blendfrei in einen Raum gelangen, im Sommer jedoch nur so viel, wie die Sehaufgaben erfordern.

Mehrkosten gegenüber konventionellen Anlagen müssen sich freilich nicht nur unter Umweltschutzaspekten, sondern auch durch geringere Energiekosten rechnen. Nach heutigem Kenntnisstand lassen sich mit den beschriebenen Verfahren bei einem normalen Büroraum etwa 50 Mark pro Jahr sparen.

Techniken der Lichtplanung

Die Computersimulation der Lichtverhältnisse in Räumen ist heutzutage sicherlich das wichtigste Werkzeug des Planers. Dazu erstellt man dreidimensio-



Bild 3: Wie Tageslicht in ein Gebäude gelangt läßt sich auch mit Modellen prüfen. Während Versuche im Freien von geeignetem Wetter abhängen, kann man im Labor die Beleuchtung gezielt einstellen. Der hier gezeigte künstliche Himmel besteht aus 85 hemisphärisch über der Modellebene angeordneten Halogenstrahlern, die jeweils einen Winkel von 38 Grad ausleuchten. Sie sind individuell dimmbar, um Himmel mit nicht homogener Leuchtdichteverteilung zu simulieren. Eine diffus streuende Kuppel läßt sich zudem zwischen Himmel und Modell setzen. Miniaturphotometer messen im Modell die Beleuchtungsstärke, Endoskope und Videokameras vermitteln Innenansichten, und mit einer kalibrierten Videoauswertung wird die Leuchtdichteverteilung ermittelt.

nale Modelle von Räumen und Gebäuden mit Konstruktionssystemen (*computer aided design*, CAD) und modelliert die verschiedenen Lichtquellen – Leuchten oder Himmel mit unterschiedlicher Bedeckung – entweder mathematisch oder mit gemessenen Werten (Bild 2). Anhand der Gesetze der Lichtausbreitung werden dann Leuchtdichten und Beleuchtungsstärken errechnet. Ein häufig verwendetes Bewertungskriterium ist der Tageslichtquotient: das Verhältnis der im Innenraum allein durch Einfall natürlichen Lichts herrschenden Beleuchtungsstärke zu der im Außenbereich; indem man bedeckten Himmel voraussetzt, ist das Ergebnis eine *Worstcase*-Abschätzung. Mit solchen Simulationen kann man den Bedarf an künstlicher Beleuchtung ermitteln. Auch Blendung und Kontrast lassen sich berechnen. Ein an unserem Institut entwickeltes Programm ermöglicht, die Simulation des Wärmehaushaltes einzubeziehen.

Freilich werden solche Berechnungen immer wieder auch durch Experimente überprüft und ergänzt (Bild 3). Dazu müssen physikalische Modelle der Gebäude oder Räume angefertigt werden, die man dann entweder im Freien oder unter Kunsthimmeln und -sonnen vermißt. Zwar ist das wesentlich aufwendiger, und Computermodelle lassen sich auch einfacher ändern, doch erhält man einen dreidimensionalen Gesamteindruck, während die Simulationen im Rechner immer nur ausgewählte Ansichten vermitteln. Schließlich gibt es für einfache Planungsaufgaben und erste Abschätzungen auch einfache Berechnungsmethoden anhand von Tabellen und Graphiken.

So verfügen Architekten und Bauphysiker über ein umfangreiches Instrumentarium zur Lichtplanung. Je intelligenter damit umgegangen, je mehr die Ressource Tageslicht genutzt wird, desto effektiver und wirtschaftlicher kann man im Gebäude entsprechende technische Hilfsmittel einsetzen.

Diplom-Ingenieur de Boer war nach dem Studium der Elektrotechnik in einem Lichtplanungsbüro tätig, bis er 1995 die Leitung der Gruppe Lichttechnik in der Abteilung Wärmetechnik des Stuttgarter Fraunhofer-Instituts für Bauphysik (Institutsleiter Karl Gertis) übernahm.

Vor fünfzig und vor hundert Jahren

1947 Der diesjährige Nobelpreis für Medizin und Physiologie ist zwischen dem Forscherehepaar Professor F. Cory und Gerty Cory von der Washington-Universität in St. Louis und Dr. B. Houssay, Physiologe an der Universität Buenos Aires, aufgeteilt worden. (Göttinger Universitäts-Zeitung, 2. Jg., Nr. 23, Seite 13)

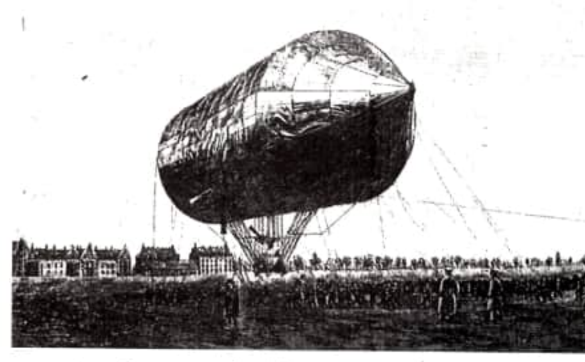
Uranofen in Harwell. Die englische Forschungsstelle für Atomenergie in Harwell, Berkshire, hatte im Sommer 1946 den Bau eines Uranofens mit Graphit in Angriff genommen, der im August 1947 mit Uran beschickt wurde und seitdem unter Versuchsbedingungen arbeitet. Der Uranofen hat keine spezielle Kühlvorrichtung, und er kann deshalb im Dauerbetrieb nur mit einer mittleren Wärmeentwicklung von 50 kW betrieben werden. Er dient zunächst als starke Quelle thermischer Neutronen für wissenschaftliche Untersuchungen, für Messung der Absorptionsquerschnitte und zur Herstellung einer kleineren Zahl radioaktiver Isotope für England. Einer der Hauptgesichtspunkte beim Bau war die vielseitige experimentelle Anwendung zur Gewinnung der Unterlagen über Kontrolle, Anordnung und Werkstoffeigenschaften für geplante Uranöfen größerer Belastbarkeit. (Physik. Blätter, 3. Jg., Heft 11, Seite 397)

Fabriken ohne Arbeiter. Aus USA ist in den vergangenen Monaten mehrfach über Rechenmaschinen berichtet worden, mit denen Rechnungen ausgeführt werden können, wie sie bisher weder von menschlichen Gehirnen noch von den bisher bekannten Rechenmaschinen bezwungen werden konnten. Diese Rechenanlagen arbeiten mit Elektronenröhren. Eine in Deutschland gebaute Anlage, die ähnliche Leistungen verzeichnet, besitzt als Übertragungsorgane für die wirkenden Kräfte die üblichen mechanischen Maschinenelemente. Man hat nun in USA aus den Erfolgen mit den Rechenanlagen weitere Konsequenzen gezogen. Man will mit Hilfe der Elektronenröhren nicht nur wie bei den Rechenanlagen einzelne Aufträge, sondern Reihen solcher Aufträge in vielfacher Wiederholung ausführen lassen. Es würden dann vollständige Fabriken ihr Arbeitsprogramm erledigen können, ohne daß ein Mensch in den Arbeitsgang einzugreifen brauchte, nachdem einmal die Einstellung dieser „Fabrik ohne Arbeiter" vorgenommen worden wäre. (Orion, 2. Jg., Doppelheft 11/12)

Eine neuer Schwangerschaftstest. Bei der Methode des „Hogben-Testes" genügen etwa 100 ccm Morgenharn. Entweder wird eine bestimmte Menge des vorher entgifteten Harnes direkt in den dorsalen Lymphsack eines Krallenfrosch-Weibchens eingespritzt, oder es wird ein Aceton-Extrakt des Harnes hergestellt, von welchem je Frosch eine bestimmte Menge, die etwa 15–20 ccm Harn entspricht, injiziert wird. Liegt eine Schwangerschaft vor, so beginnen als Folge der Prolan-Wirkung schon nach kurzer Zeit die drei Afterläppchen anzuschwellen und sich zu röten, und nach 6–10 Stunden kommt es zur Ei-Ablage. Dieser neue Schwangerschafts-Test – „Hogben-Test" – ist den bisherigen Testmethoden in bezug auf Sicherheit gleichwertig und in bezug auf Schnelligkeit und Deutlichkeit weit überlegen, da ja das Ergebnis bereits innerhalb 6–10 Stunden vorliegt. (Urania, 10. Jg., Heft 5, November 1947, Seite 199)

1897 Der Badischen Anilin- und Sodafabrik in Ludwigshafen ist es gelungen, Indigo künstlich so billig herzustellen, dass er mit dem natürlichen in Konkurrenz treten kann, und ist dieser künstliche Indigo seit ganz kurzer Zeit auf dem Markt. Das Herstellungsverfahren wird strengstens geheim gehalten... Die Badische Anilin- und Sodafabrik hat bisher alle Patente, die sich auf künstliche Darstellung des Indigo oder Hilfsprodukte dazu bezogen, aufgekauft und ungeheure Summen für praktische Ausarbeitung der Methoden für den Fabrikbetrieb und für eigene Versuche ausgegeben. Wie man sieht nicht umsonst! denn die Bedeutung dieser Erfindung ist von unübersehbarer Tragweite; falls sie sich bewährt, wird der Anbau samt der Verarbeitung der Indigopflanze, eine Industrie, die in Indien viele Tausende ernährt, eingehen, die Indigoproduktion von dieser englischen Kolonie nach Deutschland gezogen und für den deutschen Arbeiter und den deutschen Handel nutzbringend. Statt dass wir den Indigo aus Ostasien importieren, werden wir in der Lage sein, ihn dorthin zu exportieren. (Die Umschau, 1. Jg., Nr. 46, 13. November 1897, Seite 829)

Das Aluminium-Luftschiff von C. Schwarz. Am 3. November, Nachmittags 3 Uhr stieg vom Tempelhofer Felde ein von dem verstorbenen Herrn Schwarz aus Aluminium hergestelltes, angeblich lenkbares Luftschiff auf, in dessen Maschinenraum der Schlosser Jagels, ein unlängst entlassener Soldat der Luftschiffer-Abtheilung, sich befand. Dasselbe fiel nach noch nicht 6 Minuten dauernder Fahrt, wobei es vom Winde getrieben 2,5 km zurücklegte, zwischen Schöneberg und Wilmersdorf zur Erde nieder, wobei es vollständig zusammenbrach, während es dem Insassen gelang, sich durch einen Sprung aus dem Schiffe bei der Landung zu retten... Das Aluminium-Luftschiff C. Schwarz war ein nach einem bis in das kleinste Detail durchgerechneten Projecte genial erbautes Meisterstück moderner Metallarbeit, durch dessen Bau zunächst nachgewiesen worden ist, dass derartige grosse und leichte Hohlkörper constructiv möglich sind, eine Thatsache, die mit Recht



Das Aluminium-Luftschiff C. Schwarz

bisher angezweifelt wurde... In dem mit dem Gerüst des Schiffes starr verbundenen Maschinenraum war der gleichfalls im Wesentlichen aus Aluminium-Legierungen erbaute Daimler'sche Benzinmotor untergebracht. Derselbe hatte bei ca. 400 kg Gewicht eine Kraft von 10–12 Pferdestärken. Durch Uebertragung mittelst Treibriemen wurde vom Motor die ca. 3 m grosse Schiffsschraube am hinteren Theile des Maschinenraumes, sowie 2 kleinere seitlich am Schiffskörper angebrachte Schrauben bewegt. (Zeitschrift für Luftschiffahrt und Physik der Atmosphäre, XVI. Jg., Heft 11, 1897, Seiten 291 bis 293)

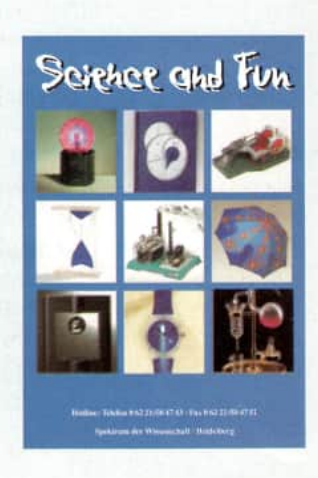
http://www.spektrum.de

Unsere Welt ändert sich in rasantem Tempo. Stündlich kommt neues Wissen hinzu, werden aufregende Entdeckungen gemacht, bisher unbekannte Zusammenhänge gefunden. Gleichzeitig ist es wichtiger denn je, den Überblick zu behalten. Spektrum der Wissenschaft Online informiert Sie über aktuelle Entwicklungen – schnell und zuverlässig.



Für Abonnenten von Spektrum der Wissenschaft bietet das **Spektrum Archiv** die Artikel der letzten fünf Jahre. (Ab Januar 1998).

Außerdem Software, Preisrätsel und die ganze Palette der Spektrum-Produkte.



Netscape - [Spektrum der Wissenschaft - Homepage]

Datei Bearbeiten Ansicht Gehe Lesezeichen Optionen Verzeichnis Fenst

Gehe zu: http://www.spektrum.de/

ZUKUNFT DES INTERNET
ANKLICKEN UND GEWINNEN

Die gr
WWW

Spektrum DER WISSENSCHAFT

ch +++ Mit Viren gegen Aids +++

- Spektrum Ticker
- Aktuelles Heft
- Sonderhefte
- Service
- Science & Fun Shop
- Extras
- Spektrum+ Club
- Jobs & Events
- Rätsel
- Diskussionen
- Spektrum Archiv

Zwischenbilanz der Marsmi
Besuch beim roten Nachba

Die Nobelpreise 1997

Diskussionsforum zur
Hochschulreform
Gelungener Start in das nächste Jah

Creatures
Spielen Sie Schöpfer!

ZEIT-Robot
Jobsuchmaschine

Abonnement | Feedback | I

© Spektrum der Wissenschaft

ticker/spektrum-ticker.html

Weltbilder entsteh

Ländlicher Raum und Umwelt in der modernen Gesellschaft

Die gesamtgesellschaftlich relevanten ökologischen Funktionen und Leistungen ländlicher Räume werden durch den Marktmechanismus nur unzureichend erfaßt. Die bisherigen Regulierungsmaßnahmen wirken in der Regel nur nachträglich, partiell und wenig effizient. Grundlegende Änderungen der ökonomischen Bedingungen und der finanzpolitischen Anreizinstrumente sind erforderlich.

Von Siegfried Bauer

Der ländliche Raum erbringt für die Bewohner der städtischen Ballungsgebiete eine Vielzahl ökologischer Leistungen: Er versorgt sie mit Trinkwasser und frischer Luft, verschafft ihnen Gelegenheit zu Naherholung, Landschaftsgenuß und Freizeitaktivitäten und etlichen Stadtmenschen auch den Platz für ein Häuschen im Grünen. Solche Leistungen werden bislang nicht bezahlt, ebensowenig wie der ländliche Raum dafür entschädigt wird, daß er organische Abfälle in den Kreislauf zurückführt, den Schadstoffausstoß der Industrie durch Verdünnung erst erträglich macht und Überschwemmungen in der Folge heftiger Niederschläge abmildert, indem er große Versickerungsflächen bereitstellt, während städtische Flächen großräumig versiegelt sind.

Es ist heute nicht mehr sinnvoll, diese Leistungen als freie Güter anzusehen. Einerseits werden sie immer knapper; andererseits steht ihre Erbringung häufig im Konflikt mit den Interessen der Landwirtschaft: Intensive Düngung beeinträchtigt das Grundwasser, modern bewirtschaftete Ackergroßflächen sind touristisch reizlos, und die langfristige ökologische Funktion naturnaher Flächen – die Erhaltung der Artenvielfalt – konkurriert mit dem Bedarf an Anbaufläche.

Bislang versuchen Gesetzgebung und Verwaltung, diese Interessenkonflikte durch eine Vielzahl von Maßnahmen zu regeln. So hat sich die Zahl der umweltbezogenen Gesetze, Verordnungen und rechtlichen Regulierungen seit 1980 vervierfacht. In aller Regel betreffen diese Vorschriften nur einen kleinen Ausschnitt der Gesamtproblematik; sie sind nicht auf ein Gesamtkonzept, sondern vorrangig auf die nachträgliche Reparatur einzelner, bereits eingetretener Schäden ausgerichtet, unkoordiniert und äußerst restriktiv; sie erregen deshalb bei den Betroffenen beträchtlichen Unmut. Gemessen an der Masse der Vorschriften ist ihr Erfolg kläglich.

Mehr denn je ist eine stärker integrierende Politikgestaltung geboten. Sie ist vom Prinzip her schwieriger als eine Umweltpolitik im industriellen Bereich und in Ballungsgebieten, weil Umweltfunktionen und Flächennutzung eng verflochten sind. Sie wird auch schwieriger durchzusetzen sein, weil sie von den bisherigen hierarchischen und ressortgegliederten Bürokratien Leistungen fordert, die diese kaum freiwillig und konfliktfrei erbringen werden. In einem Gutachten für den Sachverständigenrat für Umweltfragen haben meine Mitarbeiter Jens-Peter Abresch und Markus Steuernagel sowie ich selbst konkrete Vorschläge für eine marktwirtschaftlich orientierte Regional- und Umweltpolitik unterbreitet („Gesamtinstrumentarium zur dauerhaft umweltgerechten Entwicklung ländlicher Räume", Materialien zur Umweltforschung, Band 26, Metzler-Poeschel, Stuttgart 1996).

Landwirtschaft und ländlicher Raum: Versuch einer Typisierung

Man muß sich von der Vorstellung lösen, Politik für den ländlichen Raum sei ungefähr dasselbe wie Agrarpolitik. Die gesamtwirtschaftliche Bedeutung der Landwirtschaft ist in den letzten Jahrzehnten massiv gesunken und wird weiter sinken. Während in der Nachkriegszeit in der Bundesrepublik noch etwa 30 Prozent der Arbeitskräfte in der Landwirtschaft beschäftigt waren, sind es heute weniger als 5 Prozent. Selbst in den besonders ländlich geprägten Landkreisen beträgt dieser Anteil kaum noch 10 Prozent. Statt 20 Prozent wie in der Nachkriegszeit trägt der Agrarsektor heute nur noch etwa 1 Prozent zur gesamten Wertschöpfung bei. Die Reform der EG-Agrarpolitik im Mai 1992 hat diesen Schrumpfungsprozeß mittelfristig noch beschleunigt.

Das liegt an gesamtwirtschaftlichen Kräften, denen die agrarpolitische Intervention trotz intensivsten Bemühens nicht dauerhaft entgegenwirken kann: Der Anteil der Nahrungsmittelausgaben an den gesamten Konsumausgaben geht im Laufe der wirtschaftlichen Entwicklung geradezu gesetzmäßig zurück. Im landwirtschaftlichen Produktionsbereich selbst sowie in den vor- und nachgelagerten Sektoren ist der technische Fortschritt relativ rasch. Es ist also möglich, viele Arbeitskräfte durch Maschinen zu ersetzen; und das wird auch immer rentabler, weil nach wie vor die Löhne schneller steigen als die Zinsen. Schließlich übernehmen spezialisierte gewerbliche Unternehmen zunehmend Leistungen wie die Butterherstellung, die früher der Bauer selbst erbrachte.

Auf die Dauer wird also die Landwirtschaft samt unmittelbar dazugehörigem Gewerbe die – je nach Abgrenzung – 30 bis 40 Prozent der deutschen Gesamtbevölkerung, die auf dem Lande leben, nicht ernähren können. Eine Entvölkerung größerer Regionen wäre jedoch aufgrund der teilweise weitreichenden Folgen für das räumliche Gesamtgebilde und die eingangs genannten ökologischen Funktionen äußerst problematisch. Das Bundesraumordnungsgesetz fordert aus diesem Grunde ausdrücklich, die Funktionsfähigkeit der Regionen aufrechtzuerhalten.

Was wäre das Szenario einer wünschenswerten Zukunft? Hierfür muß man nach Regionen differenzieren. Vier Typen haben sich in unseren Untersuchungen herauskristallisiert:

– In stark landwirtschaftlich geprägten Regionen mit günstigen Standortvoraussetzungen, vor allem in Teilen Schleswig-Holsteins und Niedersachsens, werden weiterhin kleine und mittlere Höfe dem Konkurrenzdruck der Großbetriebe nicht standhalten; ihr Personal wird aus der Landwirtschaft und größtenteils auch aus der Region abwandern. Nur dadurch können die verbleibenden Betriebe weiter wachsen und so ihre Existenzfähigkeit sichern. Insgesamt wird die Bevölkerungsdichte weiter abnehmen, und für die verbleibenden Einwohner wird es schwieriger werden, sich mit Gütern und Dienstleistungen des täglichen Lebens zu versorgen. Es wird darauf ankommen, neue Formen der Infrastrukturversorgung wie mobile Dienste, kombinierte Geschäfte mit Dienstlei-

stungsangeboten und dezentrale neue Formen der Energieversorgung zu entwickeln sowie Standortvorteile für Tourismus, transportkostenunempfindliche Industrien, neue Kommunikationstechniken, Naturschutz und Landschaftspflege zu nutzen. Die Art der Landbewirtschaftung wird in diesen Gebieten mit den ökologischen Erfordernissen in Konflikt geraten, wenn die ökonomischen Rahmenbedingungen nicht auf eine nachhaltige und umweltgerechte Agrarproduktion ausgerichtet werden.

– Vor allem in Baden-Württemberg sowie in Teilen Bayerns, Hessens und Sachsens ist der Gewerbe- und Dienstleistungssektor stärker vertreten. Hier können die Landwirte den Folgen der drohenden Unterbeschäftigung ausweichen, indem sie eine andere Tätigkeit aufnehmen und die Landwirtschaft nur noch im Nebenerwerb betreiben. Zugleich bestehen in diesen Regionen höhere Ansprüche ökologischer und touristischer Art an die Landwirtschaft, etwa an das Landschaftsbild oder die Trinkwasserversorgung. Daraus ergeben sich teilweise neue Einkommensmöglichkeiten für Landwirte wie das Halten von Reitpferden, Umnutzung landwirtschaftlicher Gebäude, kommunale Dienstleistungen, ökologischer Landbau und Direktvermarktung landwirtschaftlicher Produkte.

– Ländliche Gebiete im Umfeld von Verdichtungsräumen wie dem Rhein-Main- oder dem Ruhrgebiet sind besonders stark dem beschriebenen ökologischen Druck dieser Räume ausgesetzt. Auch wenn die Landwirtschaft aus dem regionalen Blickwinkel dieser Gebiete wirtschaftlich kaum noch Bedeutung hat, besteht ein allgemeines Interesse daran, daß sie weiter betrieben wird, damit ökologische Funktionen wie Verwertung organischer Abfälle (einschließlich Klärschlamm) und Grundwasserneubildung – die in Waldgebieten stets geringer ist als unter landwirtschaftlich genutzten Flächen – erhalten bleiben. Um den widerstreitenden Nutzungsansprüchen gerecht zu werden, ist ein fairer Interessenausgleich durch finanzielle Kompensationen und Anreize erforderlich.

– Periphere, nicht industrialisierte Regionen mit ungünstigen natürlichen Bedingungen wie das Lahn-Dill-Gebiet, der Vogelsbergkreis, die Eifel, der Bayerische Wald sowie Teile von Mecklenburg-Vorpommern und Brandenburg bieten weder die Voraussetzungen für eine landwirtschaftliche noch für eine gewerbliche Entwicklung. Durch den Rückzug der Landwirtschaft fallen dort im allgemeinen die Flächen brach und nach eini-

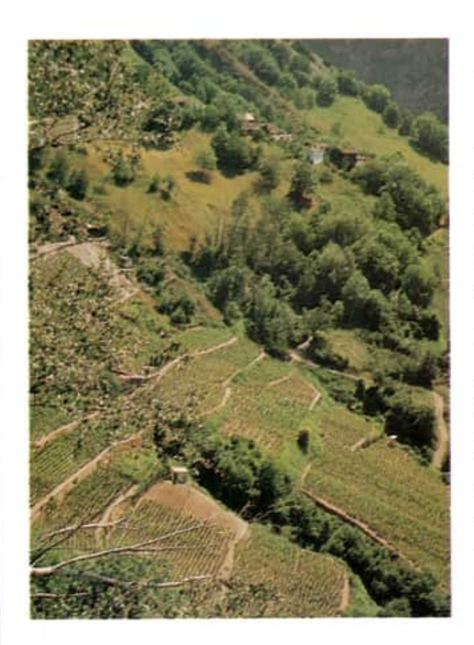
gen Jahren der natürlichen Sukzession anheim. Aus der Sicht des Naturschutzes sind jedoch oftmals Flächen, die durch eine extensive und kleinstrukturierte Landwirtschaft beeinflußt sind, ökologisch wertvoller als solche, die sich selbst überlassen bleiben. Die Lösung des Problems erfordert häufig eine Flurneuordnung, damit sich großflächige Formen einer extensiven Landbewirtschaftung, eine Art Ranching nach dem Vorbild der USA, herausbilden können und dadurch eine relativ kostengünstige Landschaftspflege möglich ist.

Ein integriertes Konzept der Umweltpolitik

In dieser Situation geht es mehr denn je darum, zentralen, übergeordneten gesellschaftspolitischen Grundanliegen die erforderliche Geltung zu verschaffen. An

Wandel der Kulturlandschaft – ein Thema auch für Schulen

Von Raimund Rodewald





Ökologische und strukturelle Vielfalt einer traditionellen Kulturlandschaft: der Weinberg Barnerchumma oberhalb von Raron im Wallis (oben). Dagegen ist der meliorierte Weinberg bei Varen im gleichen Kanton (unten) so radikal ausgeräumt worden, daß für Landschaftserlebnisse kein Platz mehr übrig bleibt.

Preßlufthammer und Baggerzahn haben unseren Lebensraum in den letzten Jahrzehnten erheblich verändert. Einst naturnahe Kulturlandschaften mit Hecken, Trokkenmauern, Obstgärten und regionaltypischem Siedlungsmuster wurden in ausgeräumte, von kanalisierten Gewässern, Straßen und ausufernden Agglomerationen geprägte Gebiete verwandelt. Noch heute ist eine Fläche von mehreren tausend Hektar jährlich in der Schweiz direkt von Landschaftsveränderungen betroffen. Die Verödung und Belastung der Landschaft wirkt sich auch auf unsere emotionale Befindlichkeit aus. Qualitäten wie Geborgenheit, Schönheit, Melancholie, aber auch Spiritualität, Geheimnisvolles, Sinnliches sind geschwunden. Dennoch wird heute die Landschaft aus unserer Alltagswelt verdrängt und in den Bereich der Lagerfeuerromantik und der Festtagsansprachen verwiesen.

Gewöhnt sich der Mensch an den rapiden Landschaftswandel? Zeigt er sich davon überhaupt betroffen? Wandelt sich parallel zu den Landschaftsveränderungen auch das Schönheitsempfinden? Werden wir am Ende technisierte, ökologisch verarmte Räume mit der Zeit schön finden? Markus Hilfiker hat in seiner Lizentiatsarbeit am Geographischen Institut der Universität Basel 1991 auf diese Fragen für die Altersgruppe der Jugendlichen eine überraschende Antwort und damit letztlich auch den methodischen Anstoß für das neue Lehrmittel „Kulturlandschaften der Schweiz" unserer Stiftung gegeben.

Die Landschaft taucht als schulisches Thema kaum einmal in einem Lehrplan auf. Landschaftsschutz gilt landläufig als Thema der Erwachsenen, ja gar der älteren Generation, eine Sache des melancholisch-sentimentalen, verklärten und resignierten Rückblicks auf die eigene Jugendzeit. Demgegenüber läßt das Ergebnis von Hilfikers Arbeit aufhorchen: Obwohl die 200 befragten Schülerinnen und Schüler im Alter von 15 bis 17 Jahren aus der Nordwestschweiz in eine bereits stark veränderte, technisierte und meist monokulturell genutzte Landschaft hineingeboren wurden, also eigentlich nur den gegenwärtigen Landschaftszustand kennen, sind sie mehrheitlich auf Landschaftseingriffe stark sensibilisiert und äußern ihre Betroffenheit über den Verlust an visueller Landschaftsqualität mit deutlichen Worten. „Ich weiß zwar nicht, wie es früher aussah, aber bestimmt viel schöner als jetzt", schrieb die 15jährige Nicole aus Oberwil, einer Agglomerationsgemeinde von Basel, und ein Klassenkamerad kommentierte Landschaftseingriffe wie folgt: „Ich glaube, daß wir dabei etwas verlieren, das wir später vermissen werden."

Jugendliche und Landschaftsschutz – ein Widerspruch? Dies ist mitnichten der Fall, wie unsere eigenen Erfahrungen und viele Aktivitäten von Jugendlichen belegen. Zu erwähnen sind hier die Sommersmog-Aktionen, das Jugendparlament (Schweizer Jugendliche üben sich als Parlamentarier und veranstalten eigene Sitzungen), die Umwelt-Jugendgruppen oder auch die kürzlich lancierte Initiative zur Halbierung des Verkehrs. Dennoch dominiert in der Verkehrs-, Städte- oder Raumplanung die Sicht der Erwachsenen.

Der Landschaftswandel schreitet so rapide voran, daß fast drei Viertel der in der Basler Studie befragten Jugendlichen befürchten, es werde in ihrer Wohnregion bald kaum mehr schöne Orte und Landschaften geben. „Wenn es so weitergeht, hat es bald kein Stück Land mehr, man kann sich nirgends mehr aufhalten, wo man sich wohl fühlt", prophezeite ein Gymnasiast aus Basel frustriert. Ein anderer hatte gar apokalyptische Visionen: „Man muß aufhören, die Welt noch mehr kaputt zu machen. Bis zum Schluß ist die Erde ein Zementklumpen." Viele Jugendliche, besonders in Agglomerationen, entwickeln – gemäß soziologischen Studien – eine „mobile Wahrnehmung": Sie empfinden zunehmend das Vertraute als Fremdkörper und das an sich Fremde als vertraut.

Mit dem Lehrmittel „Kulturlandschaften der Schweiz" versucht die Schweizerische Stiftung für Landschaftspflege und Landschaftsschutz (SL), dem Phänomen Landschaft auf die schulischen Sprünge zu helfen. Während der Erarbeitung konnten wir in zwei Schulklassen in Biel und Basel die schulische Eignung des Themas „Landschaft" prüfen. Die Ergebnisse waren sehr ermutigend.

Das Lehrmittel ist in fünf thematische Serien und sechs Regionalbeispiele gegliedert. Jedem Thema sind außer textlichen Beschreibungen Dias, didaktische Hinweise und Querverweise zu anderen

erster Stelle steht das Ziel einer nachhaltigen Entwicklung. Eine entsprechende Politik muß Rahmenbedingungen gestalten, statt mit rein operativen Zielsetzungen bereits eingetretene Schäden nur reparieren zu wollen. Verschiedene Politikbereiche sind zu diesem Zwecke stärker zu koordinieren und zu integrieren. Ihre Vertreter sollten die Grundanliegen als aktiv zu verfolgendes Ziel und Eigeninteresse verstehen und nicht länger als Nebenbedingung oder lästiges Übel.

Ein wichtiger Pfad zu einer solchen Integration ist eine Ergänzung unseres marktwirtschaftlichen Systems durch ein Netz finanzieller Anreize und Sanktionen – gewissermaßen ein weiteres Adjektiv zur Marktwirtschaft: nicht nur sozial, sondern auch ökologisch. Nachhaltige und umweltschonende Wirtschaftsweisen müssen für den Geldbeutel aller



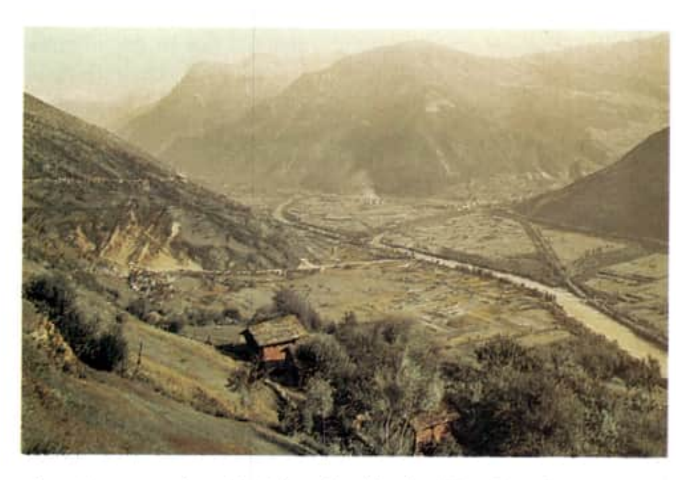


Die Pfarrkirche von Sörenberg (Kanton Luzern), 1820 außerhalb des Dorfkerns auf der grünen Wiese erbaut, genießt als Kulturdenkmal von regionaler Bedeutung den Schutz des Heimat- und Naturschutzgesetzes von 1966 (links). Das hat nicht verhindert, daß sie im Rahmen des Tourismusbooms in den sechziger Jahren mit Feriensiedlungen, Appartementhäusern und Geschäften umbaut wurde (oben). Es ist einfacher, ein Objekt zu schützen, als eine ganze Landschaft zu erhalten.

Lehrmitteln zugeordnet. Dabei wird insbesondere der Wahrnehmung und dem Wert von Landschaft, aber auch der Bedrohung und Zerstörung Beachtung geschenkt. Beispiele für Aufwertungsmaßnahmen sollen darlegen, daß es an uns ist, Landschaften auch im Positiven zu gestalten. Die Fallbeispiele aus den verschiedenen Landesteilen vertiefen die allgemeinen Ausführungen und fassen die regionaltypische Entwicklung, Bedeutung, Gefährdung und die Zukunftschancen der Kulturlandschaft zusammen.

Das Lehrmittel ist auf das 7. bis 11. Schuljahr zugeschnitten und auf deutsch, französisch und italienisch erhältlich. Dank Sponsorenbeiträgen konnte das Werk den Medienzentren gratis abgegeben werden.

Dr. phil. Rodewald ist Geschäftsleiter der Schweizerischen Stiftung für Landschaftsschutz und Landschaftspflege in Bern und Lehrbeauftragter der Universität Zürich.





Das Tal der Rhône bei Visp im Wallis 1915 (links) und 1995 (rechts). Auf den ersten Blick sieht man die Siedlungsausdehnung in die Flußebene hinaus, das starke Wachstum des Dorfes Visp und die Industrieansiedlung am Fluß. Weniger auffällig sind die Unterschiede in der Landnutzung; man erkennt vor allem, daß die Feldparzellen größer geworden sind.

Marktbeteiligten attraktiv werden. Zu diesem Zweck sind die bestehenden finanzpolitischen Mittel zu modifizieren und durch neue zu ergänzen. Insgesamt muß es jedoch um eine Reduzierung der politischen Einflußnahme gehen: weg von Geboten, Verboten und nachträglichen Korrekturen, hin zu marktwirtschaftlichen Anreizinstrumenten. In diesem Sinne stehen eine konsequentere Umweltpolitik und ein größerer unternehmerischer Handlungsspielraum nicht im Widerspruch zueinander.

An dieser Grundausrichtung orientieren sich unsere Empfehlungen, die hier nur stichwortartig wiedergegeben werden können:

– Ökosteuern für besonders umweltbelastende Produkte und Betriebsmittel, vor allem für fossile Energieträger sowie für umweltbelastende Emissionen und Betriebsmittel.

– Ein System zur Honorierung ökologischer Leistungen für private, primär landwirtschaftliche Unternehmer (Ökopunkte-Modell). Damit wären die positiven externen Effekte spezieller Bodennutzungsformen und Betriebssysteme mit geringer Intensität, vielfältiger Fruchtfolge und einem hohen Anteil an Landschaftsstrukturelementen wie Hekken, Streuobstwiesen und Feldrainen entsprechend ihren Knappheiten und somit ihrer regionalen gesellschaftlichen Bedeutung zu bezahlen. Ein solches System ist langfristig in einen ökologischen Finanzausgleich zu integrieren, indem die Kommunen als Nachfrager und private Unternehmer als Anbieter von Umweltgütern auftreten.

– Ein um ökologische Kriterien erweiterter Finanzausgleich unter den Kommunen: Der gegenwärtige Finanzausgleich berücksichtigt überregional bedeutende Infrastruktureinrichtungen wie Schulen und Theater und die Finanzstärke der Kommunen, nicht jedoch überregionale Umweltbelastungen oder -leistungen. Nach dem Vorschlag würden zum Beispiel einer Stadt, die durch Flächenversiegelung oder Luftschadstoffe ihr Umgebung besonders belastet, die Zuweisungen gekürzt, während umwelt- und naturverträgliche Aktivitäten anderer Gemeinden honoriert würden. Schon aus Gerechtigkeitsgründen wären Kommunen finanziell dafür zu entschädigen, daß sie zugunsten übergeordneter Belange, etwa durch Ausweisung eines Wasser- oder Naturschutzgebiets, in ihren Entwicklungsmöglichkeiten eingeschränkt werden.

Insgesamt soll dieses Maßnahmenpaket nicht etwa das Gesamtvolumen der öffentlichen Abgaben weiter aufblähen. Vielmehr sollen durch diese Umverteilung mittel- und langfristig Steuern und Finanzen effizienter verwendet werden. In einem ersten Schritt sind Widersprüche zwischen den Wirkungen der heute gültigen Instrumente und den allgemeinen sozialpolitischen, marktwirtschaftlichen und umweltpolitischen Zielsetzungen ausfindig zu machen und auszuräumen. Bereits dabei werden möglicherweise schon Finanzmittel frei. Die übrigen Bereiche der Regional-, Umwelt-, Agrar- und Finanzpolitik sind dann schrittweise dieser veränderten Grundausrichtung anzupassen.

Die hier skizzierten Zusammenhänge und künftigen Herausforderungen erfordern auch in der universitären und sonstigen Ausbildung neue Konzepte und Ausrichtungen. An der Universität Gießen ist mit der Fachrichtung „Umweltsicherung und Entwicklung ländlicher Räume" ein entsprechender Studiengang etabliert, der mittlerweile auf 20 Jahre Erfahrung in Forschung und Lehre verweisen kann. Integrierende Konzepte im beschriebenen Sinne werden hier in Forschung und Lehre weiter ausgebaut.

Dr. Bauer ist Professor für Projekt- und Regionalplanung in der Fachrichtung Umweltsicherung und Entwicklung ländlicher Räume an der Universität Gießen.

Blaue Liste – von der Evaluation durch den Wissenschaftsrat zum eigenen Senat

In allen Bereichen der staatlich geförderten Forschung soll mehr Wettbewerb herrschen. Die wissenschaftlichen Einrichtungen brauchen dazu nicht nur eine permanente externe Qualitätsüberprüfung, sondern auch Eigeninitiative sowie finanzielle und rechtliche Flexibilität. Als jüngste unter den großen Forschungsorganisationen stellt nun die Wissenschaftsgemeinschaft Blaue Liste die Weichen in diese Zukunft.

Von G. Hartmut Altenmüller

Vier Netzwerke von mit Steuergeldern geförderten Forschungsorganisationen überziehen Deutschland. Im Gegensatz zur Hermann-von-Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren (HGF) und zur Fraunhofer-Gesellschaft (FhG), die 90 Prozent ihrer institutionellen Förderung vom Bund erhalten, und zur Max-Planck-Gesellschaft (MPG), die zwar je zur Hälfte vom Bund und den Ländern finanziert, aber vergleichsweise zentralistisch organisiert ist, versteht sich die Wissenschaftsgemeinschaft Blaue Liste (WBL) als föderales Element in der Forschungslandschaft.

Ein WBL-Institut erhält drei Achtel seiner Grundfinanzierung von dem Bundesland, in dem es beheimatet ist, ein weiteres Achtel von der Gesamtheit der Länder und die restliche Hälfte vom Bund. Inhaltlich sieht sich die Wissenschaftsgemeinschaft Blaue Liste zwischen MPG (Grundlagenforschung) und FhG (angewandte Forschung) angesiedelt: Ihre Institute betreiben grundlagenorientierte Forschung, bleiben aber nahe am Anwendungsbezug und suchen gezielt Projektpartner in der Industrie. Sie stellen technische und gesellschaftliche Innovationen bereit, beraten Politik und öffentliche Verwaltung wissenschaftlich und geben Gutachten ab.

Die jüngste der großen deutschen Forschungsorganisationen umfaßt eine bunte Mischung aus Instituten, die teils mehr als 100 Jahre alt sind, teils erst nach der Wiedervereinigung vor allem in Ostdeutschland gegründet wurden (Kasten auf Seiten 128/129). Ihre Gemeinsamkeit bestand zunächst nur in der überregionalen und gesamtstaatlichen Bedeutung ihrer Forschungen und Dienstleistungen. Erstmals 1977 wurden sie auf einer Liste aus blauem Papier aufgeführt – daher der Name. Eine 1990 gegründete lockere Arbeitsgemeinschaft Blaue Liste mündete fünf Jahre später in den eingetragenen Verein WBL, dem zur Zeit 77 der 83 Institute und Einrichtungen angehören (Spektrum der Wissenschaft, März 1993, Seite 114, und September 1996, Seite 118). In den Einrichtungen sind rund 11 000 Mitarbeiter beschäftigt, davon 5000 Wissenschaftler. Hinzu kommen weitere 1600 bis 1700 über Drittmittel finanzierte Mitarbeiter. Im Jahre 1996 wurden die Arbeiten aller 66 Forschungs- und 17 Serviceeinrichtungen

 (Seiten 125, 126 und 127: Beihefter und Anzeige)

Widerrufsrecht:

Diese Bestellung kann innerhalb von 10 Tagen schriftlich bei Spektrum der Wissenschaft, Vangerowstraße 20, D-69115 Heidelberg, widerrufen werden. Zur Fristwahrung genügt die rechtzeitige Absendung.

Zu Ihrer Erinnerung:
Ich habe am

____

Spektrum der Wissenschaft bestellt.

Abonnement-Bestellung

Ja, ich bestelle **Spektrum der Wissenschaft** zum günstigen Jahresbezugspreis von DM 131,40 (für Schüler und Studenten auf Nachweis DM 112,80) inkl. Versandkosten als

❍ **Geschenk-Abonnement.**
❍ **Persönliches Abonnement.**

Bei Versand ins Ausland werden die Porto-Mehrkosten berechnet.

Beginn des Abonnements:
❍ ab Heft___ (die vorletzte Ausgabe erhalte ich gratis)

Dauer des Abonnements:
❍ auf ein Jahr begrenzt
❍ bis auf Widerruf

Zahlungsweise:
❍ gegen Rechnung
❍ durch Bankeinzug ❍ halbjährlich ❍ jährlich

Bankleitzahl ______________
Konto-Nummer ______________
Geldinstitut ______________

Meine Adresse:

Name/Vorname

Straße/Nr.

PLZ/Wohnort

Datum Unterschrift

Vertrauensgarantie: Ich weiß, daß ich das Recht habe, diese Bestellung innerhalb von 10 Tagen schriftlich bei Spektrum der Wissenschaft, Vangerowstraße 20, D-69115 Heidelberg, zu widerrufen und bestätige dies durch meine 2. Unterschrift. Zur Fristwahrung genügt die rechtzeitige Absendung.

2. Unterschrift

Bitte senden Sie das Geschenk-Abonnement an:

Name/Vorname

Straße/Nr.

PLZ/Wohnort

570943

Die Spektrum Bücher

Ja, ich bestelle gegen Rechnung und habe 14 Tage volles Rückgaberecht:

Verständliche Forschung

Roland Wielen (Hrsg) **NEU!**

Planeten und ihre Monde

Aktualisierte Neuauflage des erfolgreichen Readers. ***Stichworte:*** Entstehung und Entwicklung / Innerer Aufbau / Chemische Zusammensetzung / Vulkanismus / Wetter und Klima / Monde und Ringsysteme u. v. m. ca. 224 S., Br.

❑ Planeten und ihre Monde	3-8274-0218-2	48,–

Lehrbuch der Softwaretechnik

❑ Band 1	3-8274-0042-2	148,–
❑ Band 2 (bis 30.4.98) danach: DM 128,–	3-8274-0065-1	98,–
❑ Band 1 & 2 zum Sparpreis	3-8274-0301-4	198,–

Spektrum-Sachbücher

❑ Blutsauger, Staatsgründer, Seidenfabrikanten	3-8274-0078-3	58,–
❑ Puzzle Menschwerdung	3-8274-0140-2	48,–
❑ Mammutjäger in der Metro	3-86025-386-7	49,80
❑ Computerdenken	3-89330-708-7	20,–
❑ Flüstern des Urknalls	3-86025-111-2	15,–

Spektrum Neurowissenschaften

❑ Methoden der Hirnforschung	3-8274-0108-9	78,–
❑ Klinische Neurobiologie	3-8274-0069-4	88,–
❑ Kopf-Arbeit	3-86025-256-9	78,–
❑ Das Gehirn	3-86025-222-4	58,–

zzgl. Versandkosten (in D/A/CH: pauschaler Versandkostenanteil: DM 6,-)

Name/Vorname/Titel

Straße/Nr.

PLZ/Wohnort

Datum/Unterschrift

Sie können Ihre Bestellung auch telefonisch (0 70 71 - 93 53 60) oder per Fax (0 70 71 - 93 53 93) aufgeben.
e-mail: shop@spektrum-verlag.com
http://www.spektrum-verlag.com

SdW 11/97

Die Spektrum Videothek

Topvideos
jetzt besonders günstig!

Biowissenschaften

❑ AIDS	3-86025-791-9	68,–
❑ Apoptose und Nekrose	3-8274-0500-9	99,–
❑ DNA Typing und Sequenzanalyse	3-8274-0505-X	68,–
❑ Drogen und Gehirn	3-8274-0502-5	99,–
❑ Gehirn und Nervensystem	3-89330-966-7	49,80
❑ Genexpression	3-8274-0503-3	68,–
❑ Krebs und Immunsystem	3-89330-934-9	99,–
❑ Künstlicher Schlaf	3-8274-0508-4	99,–
❑ Mensch und Bakterien	3-86025-782-X	99,–
❑ Menschliches Leben entsteht	3-86025-815-X	99,–
❑ *Paket* 'Die Zelle 1 und 2' (2 Videos)	9-49997-204-8	99,–
❑ Pilze und Parasiten	3-86025-784-6	99,–
❑ Der programmierte Zelltod	3-86025-811-7	99,–
❑ Viren	3-86025-783-8	99,–

Geowissenschaften

❑ Edelsteine	3-86025-814-1	49,80
❑ Klimaforschung	3-86025-751-X	49,80
❑ *Paket* Erdbeben/Kontinentaldrift/Vulkanismus (3 Videos)	9-49997-207-2	99,–

zzgl. Versandkosten (in D/A/CH: pauschaler Versandkostenanteil: DM 6,-)

Name/Vorname/Titel

Straße/Nr.

PLZ/Wohnort

Datum/Unterschrift

Sie können Ihre Bestellung auch telefonisch (0 70 71 - 93 53 60) oder per Fax (0 70 71 - 93 53 93) aufgeben.
e-mail: shop@spektrum-verlag.com
http://www.spektrum-verlag.com

SdW 11/97



Als Abonnent von Spektrum der Wissenschaft werde ich kostenlos und automatisch Mitglied im **Spektrum+ Club**. Ich erhalte damit Zugang zu einem attraktiven Exklusiv-Angebotsprogramm.

Bitte frankieren, falls Marke zur Hand

Antwort

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT
Leser-Service
Vangerowstraße 20

D-69115 Heidelberg

Spektrum-Sammelkassette



Die Sammelkassette bietet Platz für 12–15 Spektrum-Hefte und kostet DM 16,50 zzgl. Porto.

Maschine schlägt Geist?



Roger Penrose

Computerdenken

Eine leidenschaftliche Auseinandersetzung um die Frage, ob Maschinen irgendwann einmal so weit kommen können, ähnlich wie Menschen zu denken und zu fühlen. Eine Frage, die seit dem Sieg des IBM-Schachcomputers **Deep Blue** über den Schachweltmeister Garri Kasparow eine besondere Aktualität und Brisanz gewonnen hat. Penrose weltweiter Bestseller jetzt zum Sparpreis von nur DM 20,-!

1991, 454 S., Br.
DM 20,- / öS 146,- / sFr 19,-
ISBN 3-89330-708-7

Bitte freimachen

Antwort

SFG Servicecenter
Fachverlage GmbH
Postfach 43 43

D-72774 Reutlingen

Vom Anfang des Universums



M. Rowan-Robinson

Das Flüstern des Urknalls

Packender Insider-Bericht über die bahnbrechenden kosmologischen Entdeckungen der beiden Beobachtungssatelliten IRAS und COBE, die die Urknalltheorie in neuem Licht zeigen!
1994, 280 S., 90 Abb., geb.
DM 15,- / öS 110,- / sFr 14,-
ISBN 3-86025-111-2

Mathematik / Informatik

❑ *Paket* „Chaos und Fraktale" (3 Videos)	9-49997-203-X	99,–
❑ Knoten ohne Knoten	3-86025-753-6	29,80
❑ *Paket* „Künstliche Intelligenz" (4 Videos)	9-49996-200-X	99,–
❑ *Paket* „Mathematik in der Praxis" (3 Videos)	9-49996-201-8	79,95
❑ Virtuelle Realität	3-86025-763-3	49,80

Physik / Astronomie

❑ Atome sehen	3-89330-968-3	49,80
❑ Licht und Farbe	3-86025-794-3	49,80
❑ Laser und Hologramm	3-89330-980-2	49,80
❑ Zehn^{hoch}	3-89330-999-3	29,80
❑ Reise durch Raum und Zeit	3-86025-756-0	49,80
❑ Saturn, Uranus, Neptun, Pluto	3-89330-964-0	49,80
❑ Urknall, Quasare und Schwarze Löcher	3-86025-803-6	99,–
❑ Videoverzeichnis 1997	9-49997-150	kostenlos

Bitte freimachen

Antwort

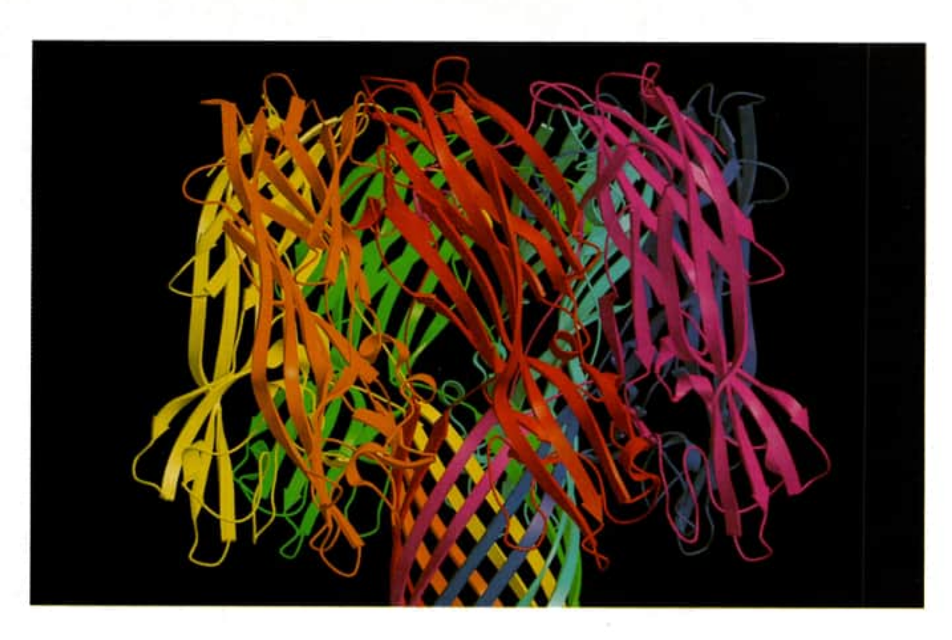
SFG Servicecenter
Fachverlage GmbH
Postfach 43 43

D-72774 Reutlingen



Künstliche Intelligenz 1-4

Mit Hilfe von faszinierenden und unterhaltsar Beispielen gibt diese vierteilige Video-Serie einen allgemeinverständlichen Überblick über wesentliche Grundlagen, wichtige Anwendun und mögliche Auswirkungen der **Künstlicher Intelligenz.**
Jede Folge: 31 Min., Farbe, VHS
Paketpreis: DM 99,- / öS 799,- / sFr 95,-
ISBN 9-49996-200-X



Designer-Piercing

Lebende Zellen regulieren ihren Stoffaustausch mit dem umgebenden Milieu durch winzige Poren in ihrer äußeren Membran. Bakterien können sie aber durch Bildung zusätzlicher Kanäle in dieser Hülle leckschlagen lassen, wie auch das Immunsystem Krankheitskeime derart angreift. Nach diesem Muster werden nun künstliche, nach Bedarf offene oder geschlossene Zellschleusen entwickelt.

Damit soll zum Beispiel Tumorgewebe infiltriert werden, das dann für die chemische Krebstherapie zugänglicher würde. Des weiteren könnten mit solchen Poren versehene synthetische Membranen als Biosensoren dienen, Schadstoffe aus dem Blut bei Nierenversagen oder aus kontaminiertem Wasser filtern und in Form von Kapseln Medikamente oder Hormone an bestimmten Stellen im Körper dosiert abgeben.

Als gut hantierbarer Porenbaustein erwies sich ausgerechnet ein Protein von *Staphylococcus aureus*, einem gefürchteten Erreger von Krankenhausinfektionen. Jeweils sieben der Moleküle lagern sich in Zellmembranen zu einem hohlen pilzförmigen Gebilde zusammen (Bild). Die Segmente können gentechnisch so verändert werden, daß sich der rund zwei Nanometer (millionstel Millimeter) weite Durchlaß sperren und wieder freimachen läßt – biochemisch mit Enzymen, chemisch durch Anlagern und Abspalten etwa eines Metall-Ions sowie auch physikalisch mit Licht oder Wärme.

Weitere Themen im nächsten Heft:
FORUM über Perspektiven der Hochschul-Entwicklung – Der Nachweis des Top-Quarks – Modellierung von Turbulenz – Plastinierte anatomische Präparate des Menschen – Ansätze zur Gentherapie von Krebs – Technische Gläser und Glaskeramiken – Entwicklungslinien elektronischer Musik.



Angebot an unsere Abonnenten

Als regelmäßiger Leser können Sie beurteilen, wie wichtig es ist, über Forschung und Technologie authentisch informiert zu sein. Wir bitten Sie darum, Spektrum der Wissenschaft weiterzuempfehlen; wir bedanken uns dafür mit dem Buch „Spielintelligenz" von M. Kauke. Einzelheiten entnehmen Sie bitte der beiliegenden Empfehlungskarte.

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, die deutsche Ausgabe des weltweit verbreiteten SCIENTIFIC AMERICAN, vermittelt in seinen Artikeln und Beiträgen Monat für Monat einen fachübergreifenden Überblick über den aktuellen Stand von Naturwissenschaften, angewandter Forschung und Technologie sowie deren wirtschaftliche und gesellschaftliche Relevanz. Auf hohem sachlichem Niveau, kompetent und authentisch – denn hier schreiben international renommierte Wissenschaftler selbst über ihre Arbeiten.

Bis diese Erkenntnisse Allgemeingut werden oder auch Anwendungen finden, vergehen oft Jahre. Dieser Informationsvorsprung macht SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT zu einem Frühwarnsystem für innovative Entwicklungen.

Wissenschafts- und bildungspolitische Aspekte behandelt die Rubrik „Forschung und Gesellschaft", spezifische Anwendungsperspektiven insbesondere der Teil „Entwicklung & Technologie", Themen der öffentlichen Diskussion der Schwerpunkt „FORUM".

Nutzen Sie die Vorteile des Abonnements:

- Vorzugspreis von DM 10,95 statt DM 12,50 pro Heft.
- Für Schüler und Studenten DM 9,40.
- Die Oktober-Ausgabe 1997 zusätzlich zu Ihrem Abonnement.
- Abonnenten werden kostenlos Mitglied im **Spektrum⁺ Club** und haben dadurch Zugang zu exklusiven Angeboten.

Sie können Ihr Abonnement schon mit der nächsten Ausgabe beginnen, wenn Sie die versandfertige Bestell-Postkarte ausgefüllt an uns absenden.



der Blauen Liste mit rund 1,3 Milliarden Mark gefördert.

Die WBL hat nunmehr ein wissenschaftliches und politisches Profil erarbeitet. Wenn dieses Heft ausgeliefert wird, hat soeben (vom 29. bis zum 31. Oktober dieses Jahres) die Jahrestagung der Wissenschaftsgemeinschaft in Bonn weitreichende Beschlüsse verabschiedet. Im nächsten Jahr soll ein Senat gebildet werden, der globale Steuerungs- und Beratungsfunktionen wahrnimmt und die Leistungen der Institute kontinuierlich überprüft. Gleichzeitig soll die WBL in Wissenschaftsgemeinschaft Gottfried Wilhelm Leibniz (WGL) umgetauft werden.

Ihre Stärke ist die Vielfalt

Die WBL versteht sich als korporativer Akteur: Sie sieht ihre Chance darin, gerade ihre Vielfalt zu nutzen und die Zusammenarbeit ihrer Institute mit Universitäten und außeruniversitären Einrichtungen, mit der Wirtschaft und auf regionaler Ebene in den Vordergrund zu rücken. In einer vom Wettbewerb geprägten Forschungslandschaft will sie sich mit gemeinsamem, öffentlich wahrnehmbarem Handeln profilieren. Aus den elf Sektionen der Arbeitsgemeinschaft sind inzwischen fünf umfangreichere Sektionen geworden (siehe nebenstehenden Kasten).

Mit seinen „Leitlinien" von 1996 hat Bundesforschungsminister Jürgen Rüttgers die Institute der Blauen Liste in stärkeren Wettbewerb um Forschungsmittel gedrängt. Sie sollten bis zu fünf Prozent ihrer Grundfinanzierung dem Gutachterverfahren der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) unterwerfen: einer inhaltlichen Prüfung der Projekte mit Bewilligung oder auch Ablehnung der Mittel. Die Geschäftsstelle der DFG ist im Prinzip zu einer Begutachtung bereit, sieht sich aber mit dem Arbeitsaufwand überlastet. Die WBL dagegen war anfangs skeptisch. Sie begrüßt zwar, daß ihr im Prinzip der volle Zugang zu den Fördertöpfen der DFG eröffnet wird (der ihr bis dahin nur für Randthemen offenstand), hält jedoch die Mittelabgabe für sehr problematisch. Ein Kompromiß sieht nun vor, daß in einer auf drei Jahre begrenzten Probephase nur 2,5 Prozent der Mittel abgegeben werden. Schon das werde zu Lasten ihrer Grundlagenforschung gehen, befürchtet Günter Mateika, kaufmännischer Direktor des Instituts für Polymerforschung in Dresden, das schon heute etwa diesen Anteil seines Gesamtetats von der DFG erhält.

Wissenschaftsgemeinschaft Blaue Liste (WBL)

Sektion A: Geisteswissenschaften und Bildungsforschung

DBM	Deutsches Bergbau-Museum, Bochum
DBI	Deutsches Bibliotheksinstitut, Berlin
DIE	Deutsches Institut für Erwachsenenbildung, Frankfurt am Main
DIFF	Deutsches Institut für Fernstudienforschung an der Universität Tübingen
DIPF	Deutsches Institut für Internationale Pädagogische Forschung, Frankfurt am Main
DSM	Deutsches Schiffahrtsmuseum, Bremerhaven
HI	Herder-Institut e. V., Marburg
IWF	Institut für den Wissenschaftlichen Film gGmbH, Göttingen
IdS	Institut für deutsche Sprache, Mannheim
IPN	Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften an der Universität Kiel
IfZ	Institut für Zeitgeschichte, München
ZPID	Zentralstelle für Psychologische Information und Dokumentation an der Universität Trier

Sektion B: Wirtschafts- und Sozialwissenschaften, Raumwissenschaften

ARL	Akademie für Raumforschung und Landesplanung, Hannover
DIW	Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung, Berlin
DÜI	Deutsches Übersee-Institut, Hamburg
FÖV	Forschungsinstitut für öffentliche Verwaltung bei der Hochschule für Verwaltungswissenschaften, Speyer
GESIS	Gesellschaft Sozialwissenschaftlicher Infrastruktureinrichtungen e. V., Köln/Bonn/Mannheim
HWWA	Institut für Wirtschaftsforschung, Hamburg
ifo	Institut für Wirtschaftsforschung e. V., München
IAMO	Institut für Agrarentwicklung in Mittel- und Osteuropa, Halle an der Saale
IfL	Institut für Länderkunde e. V., Leipzig
IÖR	Institut für ökologische Raumentwicklung e. V., Dresden
IRS	Institut für Regionalentwicklung und Strukturplanung e. V., Erkner
IfW	Institut für Weltwirtschaft an der Universität Kiel, zugleich:
ZBW	Zentralbibliothek der Wirtschaftswissenschaften, Kiel
IWH	Institut für Wirtschaftsforschung, Halle an der Saale
RWI	Rheinisch-Westfälisches Institut für Wirtschaftsforschung, Essen
WZB	Wissenschaftszentrum Berlin für Sozialforschung gGmbH, Berlin

Sektion C: Lebenswissenschaften

BNI	Bernhard-Nocht-Institut für Tropenmedizin, Hamburg
DFA	Deutsche Forschungsanstalt für Lebensmittelchemie, Garching
ZBL	Deutsche Zentralbibliothek für Landbauwissenschaften, Bonn
DIfE	Deutsches Institut für Ernährungsforschung, Potsdam-Rehbrücke
DPZ	Deutsches Primatenzentrum GmbH, Göttingen
DFI	Diabetes-Forschungsinstitut an der Heinrich-Heine-Universität, Düsseldorf
DSMZ	Deutsche Sammlung von Mikroorganismen und Zellkulturen GmbH, Braunschweig
FBN	Forschungsinstitut für die Biologie landwirtschaftlicher Nutztiere, Dummerstorf
FKE	Forschungsinstitut für Kinderernährung, Dortmund
FMP	Forschungsinstitut für Molekulare Pharmakologie, Berlin
FIS	Forschungsinstitut und Naturmuseum Senckenberg der SNG, Frankfurt am Main

Auch das Institut für Troposphärenforschung in Leipzig wirbt, wie sein Direktor Jost Heintzenberg betont, einen Anteil, der 2,5 Prozent seiner Grundfinanzierung entspricht, längst von der DFG ein. Viele weitere WBL-Institute befinden sich jetzt schon in der von den Leitlinien beschworenen Wettbewerbssituation, und WBL-Präsident Ingolf Hertel, Direktor des Max-Born-Instituts in Berlin, hofft sogar, daß der von der DFG eingeworbene Anteil „recht bald im Durchschnitt fünf bis zehn Prozent" betragen werde.

Die WBL will jedoch noch weiter gehen und die Organisation des Wettbewerbs künftig selbst in die Hand nehmen, etwa mit einem eigenen Förderfonds. Ähnlich wie jetzt schon in der HGF soll künftig ein Senat als eigenständiges Organ der neu zu etablierenden WGL unter anderem die Wettbewerbsfä-

FZB	Forschungszentrum Borstel, Zentrum für Medizin und Biowissenschaften
HPI	Heinrich-Pette-Institut für Experimentelle Virologie und Immunologie an der Universität Hamburg
IfA	Institut für Arbeitsphysiologie an der Universität Dortmund
IMB	Institut für Molekulare Biotechnologie e. V., Jena
IfN	Institut für Neurobiologie, Magdeburg
IPB	Institut für Pflanzenbiochemie, Halle an der Saale
IPK	Institut für Pflanzengenetik und Kulturpflanzenforschung, Gatersleben
IZW	Institut für Zoo- und Wildtierforschung, Berlin
ZFMK	Zoologisches Forschungsinstitut und Museum Alexander Koenig, Bonn

Sektion D: Mathematik, Natur- und Ingenieurwissenschaften

AIP	Astrophysikalisches Institut Potsdam
FCH	Fachinformationszentrum Chemie GmbH, Berlin
FIZ KA	Fachinformationszentrum Karlsruhe, Gesellschaft für wissenschaftlich-technische Information mbH
FBH	Ferdinand-Braun-Institut für Höchstfrequenztechnik Berlin
FZR	Forschungszentrum Rossendorf e. V.
HHI	Heinrich-Hertz-Institut für Nachrichtentechnik Berlin GmbH
IAP	Institut für Atmosphärenphysik an der Universität Rostock, Kühlungsborn
IfE	Institut für Erdöl- und Erdgasforschung, Clausthal-Zellerfeld
IFW	Institut für Festkörper- und Werkstofforschung Dresden e. V.
IHP	Institut für Halbleiterphysik GmbH, Frankfurt an der Oder
IKZ	Institut für Kristallzüchtung, Berlin
INP	Institut für Niedertemperatur-Plasmaphysik e. V., Greifswald
IOM	Institut für Oberflächenmodifizierung e. V., Leipzig
IPF	Institut für Polymerforschung Dresden e. V.
ISAS	Institut für Spektrochemie und angewandte Spektroskopie, Dortmund
KIS	Kiepenheuer-Institut für Sonnenphysik, Freiburg
MBI	Max-Born-Institut für Nichtlineare Optik und Kurzzeitspektroskopie, Berlin
PDI	Paul-Drude-Institut für Festkörperelektronik, Berlin
TIB	Universitätsbibliothek und Technische Informationsbibliothek, Hannover
WIAS	Weierstraß-Institut für Angewandte Analysis und Stochastik, Berlin

Sektion E: Umweltwissenschaften

ATB	Institut für Agrartechnik Bornim e. V., Potsdam-Bornim
IGZ	Institut für Gemüse- und Zierpflanzenanbau Großbeeren/Erfurt e. V.
IGB	Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei, Berlin
IfM	Institut für Meereskunde an der Universität Kiel
IOW	Institut für Ostseeforschung Warnemünde an der Universität Rostock
IfT	Institut für Troposphärenforschung e. V., Leipzig
PIK	Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung e. V., Potsdam
ZALF	Zentrum für Agrarlandschafts- und Landnutzungsforschung e. V., Müncheberg

Weitere Institute der Blauen Liste ohne Mitgliedschaft in der WBL

DM	Deutsches Museum, München
GNM	Germanisches Nationalmuseum, Nürnberg
MIUH	Medizinisches Institut für Umwelthygiene an der Universität Düsseldorf
ZBM	Zentralbibliothek der Medizin, Köln
RGZM	Römisch-Germanisches Zentralmuseum, Forschungsinstitut für Vor- und Frühgeschichte, Mainz
NLfB-GGA	Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung – Geowissenschaftliche Gemeinschaftsaufgaben, Hannover

higkeit der Institute sichern und mit der regelmäßigen Bewertung ihrer Arbeit die systematische Evaluation fortsetzen, mit der zur Zeit der Wissenschaftsrat die WBL auf das Jahr 2000 vorbereitet. Interne Qualitätsbewertungen durch die wissenschaftlichen Beiräte der Institute würden dann um externe Bewertungen durch den Senat ergänzt werden, in dem kein Angehöriger eines WBL-Instituts Stimmrecht hat.

Nach den aktuellen Vorstellungen benennt der Senat Schwerpunkte, ist aber nicht weisungsberechtigt. Er berät die WBL als stabilisierende, jedoch nicht zentrale Wissenschafts- und Finanzsteuerungsinstitution. Gleichwohl könnte er aus einem WBL-eigenen Fonds Mittel für die Projekt- und Nachwuchsförderung vergeben und Empfehlungen zu Ausschluß und Aufnahme von Instituten beschließen. Der Direktor des Instituts für Länderkunde in Leipzig, Alois Mayr, fordert außerdem für den Vorstand der WGL eine starke Stellung, ähnlich wie bei der MPG. Doch anders als bei dieser werden Institute der Blauen Liste nicht zentral unter wissenschaftlichen Gesichtspunkten ausgewählt und gegründet, sondern treten jedes für sich der Gemeinschaft bei – oder auch nicht – und führen selbständig die Finanzverhandlungen mit der staatlichen Seite.

Nach diesen deutlichen Reformen und der Bildung eines ausgeprägteren Profils wird es interessant sein zu beobachten, ob die WGL in die – bisher zurückhaltende – sogenannte Allianz aufgenommen wird. Diesem informellen Gesprächskreis gehören unter anderem die Präsidenten von Wissenschaftsrat, MPG, DFG, Hochschulrektorenkonferenz, HGF und FhG an. Unabhängig davon will die künftige WGL jetzt auch Mitglied der DFG werden.

Umsetzung der Evaluationen

Welch delikate Aufgabe auf den noch zu gründenden WGL-Senat wartet, demonstrieren die gegenwärtigen Schwierigkeiten, die Empfehlungen des Wissenschaftsrats umzusetzen. Bis zum Juli dieses Jahres hatte dieser im Rahmen der Evaluation aller Blaue-Liste-Einrichtungen 31 Institute besucht und 21 Stellungnahmen verabschiedet, davon 15 positive und vier negative; zwei weitere negative Bewertungen betrafen nur den Forschungs-, nicht den Service-Sektor von Instituten.

Das blieb nicht ohne Folgen. Gegen zum Teil heftige Proteste hat die zuständige Bund-Länder-Kommission für Bildungsplanung und Forschungsförderung (BLK) beschlossen, die gemeinsame Bund-Länder-Förderung für zwei Institute zu beenden: das Institut für Kinderernährung in Dortmund und das Institut für Erdöl- und Erdgasforschung in Clausthal-Zellerfeld. Die zwei anderen ebenfalls negativ bewerteten Einrichtungen, die Abteilung Geowissenschaftliche Gemeinschaftsaufgaben in Hannover und das Medizinische Institut für Umwelthygiene in Düsseldorf, haben dagegen noch eine Chance: Der Bund sowie die betroffenen Länder Niedersachsen und Nordrhein-Westfalen wollen Konzepte für eine Neustrukturierung vorlegen, die das Votum des Wissenschaftsrates berücksichtigen. Darauf will die BLK noch warten.

Unklar ist die Lage beim Institut für den Wissenschaftlichen Film in Göttingen. Der Wissenschaftsrat hält an seiner

negativen Bewertung fest, obwohl kurz nach dem Besuch die Leitung des Instituts gewechselt hat und die seit langem angemahnten Reformen eingeleitet worden sind. Das ist das Fallbeil bei den Evaluationen des Wissenschaftsrats: Verbesserungen, die erst hinterher kommen, haben es schwer, noch berücksichtigt zu werden.

Das Bundesforschungsministerium will das Institut nicht mehr fördern. Nach dem Besuch einer zweiten, von den zuständigen Ministerien in Bonn und Hannover eingesetzten Prüfungsgruppe kommt zunehmend die Befürchtung auf, die staatlichen Stellen wollten privaten Multimedia-Interessenten Aufgaben des Instituts übertragen. Auch die Fachinformationszentren innerhalb der Blauen Liste möchte der Bund am liebsten privatisieren.

Ein spezielles Problem sind die Wirtschaftsforschungsinstitute. In einer Stellungnahme Anfang 1996 bewertete der Wissenschaftsrat die Service-Leistungen des HWWA-Instituts für Wirtschaftsforschung Hamburg als akzeptabel; in der Forschung gebe es jedoch erhebliche Mängel. Als sich ähnliche Tendenzen auch in der Beurteilung anderer Wirtschaftsforschungsinstitute andeuteten, intervenierten offensichtlich vor der Publikation Kreise aus Wirtschaft und Politik, die auf die Gutachten dieser Institute nicht verzichten wollen. Der Wissenschaftsrat berief eine Arbeitsgruppe „Empirische Wirtschaftsforschung" ein, die im November dieses Jahres Stellung nehmen wird. Bis dahin bleibt die Frage offen, ob es besondere Kriterien für die wirtschaftswissenschaftlichen Institute geben soll.

Gute Kooperation mit Universitäten gibt den Ausschlag

Ein zentraler Punkt in der Beurteilung der WBL-Institute ist ihre wissenschaftliche Kooperation mit den Hochschulen. Vor allem für die neuen ostdeutschen Institute ist es selbstverständlich, daß sie ihre leitenden Wissenschaftler gemeinsam mit einer benachbarten Universität berufen, Doktoranden im außeruniversitären Institut, das oft besser mit Geräten ausgestattet ist, ihre Dissertation machen, Universitätsprofessoren das Potential des WBL-Instituts nutzen, die Zusammenarbeit in Sonderforschungsbereichen und Verbundprojekten mit der Wirtschaft gepflegt wird. Im Westen ist dies bis heute weniger gebräuchlich; so warf der Wissenschaftsrat dem HWWA noch im Januar 1996 vor, die Kooperation mit den benachbarten Universitäten fachlich nicht genügend ausgebaut zu haben.

Das ifo-Institut für Wirtschaftsforschung in München, das anscheinend ebenfalls die Zusammenarbeit mit den Universitäten jahrelang verschlafen hat, schloß am 11. September einen Kooperationsvertrag mit der Universität München – allerdings, so eine ifo-Sprecherin, „nicht mit Hinblick auf den Wissenschaftsrat". Man vereinbarte gemeinsame Forschungsvorhaben, die Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses, gemeinsame Veröffentlichungen und Fachkonferenzen sowie Praktikantenplätze für Studenten.

Da es, wie geschildert, schwierig ist, Einrichtungen aus der Blauen Liste zu streichen, fällt es angesichts der Finanzknappheit schwer, neue aufzunehmen, auch wenn das sehr gut begründet ist. Bei der Feier zum 40jährigen Bestehen des Wissenschaftsrates am 2. Oktober in Bonn hat dessen Vorsitzende Dagmar Schipanski diesen Punkt deutlich angesprochen: „Wie sich zeigt, sind wir noch nicht annähernd darauf vorbereitet, nicht nur aufzubauen, sondern auch abzubauen. Die Entwicklung einer Kultur der Schließung müssen Wissenschaft und Politik erst noch erlernen. Anreiz muß sein, mit den freiwerdenden Mitteln wissenschaftlich hochkarätigen Einrichtungen... den Eintritt in die Blaue Liste zu ermöglichen."

Auf Empfehlung des Wissenschaftsrates hat die BLK beschlossen, das Institut für Neue Materialien in Saarbrücken auf die Blaue Liste zu setzen – aber erst, wenn Mittel dafür vorhanden sind. Der Bund drängt darauf, im Vorgriff auf freiwerdende Mittel ausscheidender Institute das Berliner Elektronensynchrotron BESSY II aufzunehmen, aber die Finanzierung dieser großen und teuren Einrichtung können Berlin und die anderen Bundesländer zunächst nicht allein leisten. Trotz Empfehlung stehen des weiteren auf der Warteliste das Berliner Museum für Naturkunde – das größte naturhistorische Forschungsmuseum in Deutschland – und das Deutsche Forschungsnetz (DFN-Verein), das ein Hochgeschwindigkeits-Informationsnetz für die Wissenschaft betreibt (Spektrum der Wissenschaft, Oktober 1996, Seite 112). Zwei andere Institute befinden sich im Auf- beziehungsweise Umbau, so daß der Wissenschaftsrat sie erst am Ende seiner Evaluationsperiode 1999 noch einmal prüfen wird.

Die Auseinandersetzungen um die WBL und die Schwierigkeiten, in der vielfältigen deutschen Wissenschaftslandschaft neue Akzente zu setzen sowie Schwerpunkte und Kooperationen neu zu verteilen, spiegeln sich wider in einer neu eingerichteten Arbeitsgruppe des Wissenschaftsrates, die unabhängig vom Tagesgeschäft überlegt, wie sich das deutsche Wissenschaftssystem entwikkeln müßte. Sollen zum Beispiel außeruniversitäre Institute in die Hochschulen integriert werden? Das ist eine der im Zusammenhang mit der WBL am leidenschaftlichsten diskutierten Fragen. „Alles wird auf den Tisch gelegt", heißt es beim Wissenschaftsrat.

Ein Saatbeet für künftige Forschung

Interview mit dem sächsischen Staatsminister für Wissenschaft und Kunst, Prof. Dr. Hans Joachim Meyer, zur Rolle der Institute der Blauen Liste.

Welche Rolle spielen die Institute der Blauen Liste in der Wissenschaftspolitik des Freistaates Sachsen?

Wir sind stolz auf sie und halten sie für eine sehr wesentliche Komponente unserer Forschungslandschaft.

Warum werden dann ihre Existenz und ihre Position außerhalb der Universität immer wieder angefochten?

Dafür gibt es mehrere Gründe. Einer von ihnen ist die thematische Heterogenität, die aus der Entstehungsgeschichte zu verstehen ist.

Der zweite Grund: Als es darum ging, die Wissenschaftslandschaft im Osten Deutschlands neu zu ordnen, meinten sehr einflußreiche Leute, dies sei nun die Chance, der seit der Zeit vor dem Ersten Weltkrieg stetig steigenden Bedeutung der außeruniversitären Forschung im Vergleich zu den Universitäten einen Riegel vorzuschieben und das Blatt zu wenden. Außerdem wurde damals die Behauptung verbreitet, die Universitäten und Hochschulen der DDR seien reine Lehreinrichtungen gewesen und die Forschung sei in die Akademie der Wissenschaften ausgewandert. Seit 1991 bemühen wir uns, dieser Behauptung entgegenzutreten. Wir können dazu Zahlen

und Aussagen von unabhängigen Quellen vorlegen: Es stimmt einfach nicht. Gleichwohl wird bis heute diese Behauptung unverdrossen wiederholt.

Dahinter steckten und stecken meines Erachtens Verteilungskämpfe. Man war sich darüber im klaren, daß im Osten sehr wohl leistungsfähige Wissenschaftseinrichtungen bestehen und daß diese im Rahmen der Gemeinschaftsaufgabe und des gesamtdeutschen Länderfinanzausgleichs einen höheren Anteil an dem erhalten müßten, was insgesamt für die Forschung in Deutschland zur Verfügung steht – auf Kosten der alteingesessenen westlichen Institute.

Die heutigen Blaue-Liste-Institute waren vorher nicht in Universitäten und Hochschulen, sondern selbständige Einrichtungen. Wir können sie jetzt auch gar nicht in die Hochschulen integrieren. Angesichts unserer finanziellen Möglichkeiten müßten wir dann entweder weite Teile der Hochschulen oder diese Institute schließen.

Andererseits hat der Bund immer darauf hingewiesen, daß das Forschungspotential, das ja in den sogenannten neuen Bundesländern wesentlich natur- und ingenieurwissenschaftlicher Art ist, für uns und unser wirtschaftliches und öffentliches Leben unverzichtbar ist. Trotzdem geht die Debatte um die BL-Institute unverdrossen weiter, die Verteilungskämpfe haben auch eher an Schärfe zu- als abgenommen.

Übrigens sind die Bemühungen leistungsstarker BL-Institute insbesondere aus dem Osten Deutschlands um eine kräftigere Selbstprofilierung der Blauen Liste als wissenschaftliche Gemeinschaft bei einer Reihe dieser Institute im Westen nicht auf die Unterstützung gestoßen, die wir erhofft hatten.

Wir müssen eine Lösung finden, die in sich das Merkmal der sinnvollen und akzeptierten Stabilität trägt. Es kann nicht angehen, daß wir Jahr um Jahr erneut erklären müssen, warum es Institute der Blauen Liste gibt und daß es völlig unsinnig ist zu fordern, diese in die Hochschulen einzubeziehen.

Wie wird sich das Verhältnis der Blaue-Liste-Institute zur DFG gestalten?

Unsere Institute sehen es als Gütesiegel, wenn sie im DFG-Wettbewerb erfolgreich sind, und sind bereit, sich dem zu stellen. Dann sollen sie aber auch nicht am Katzentisch der DFG sitzen. Wenn wir erstens die Zusammenarbeit zwischen BL-Instituten und Hochschulen ganz konsequent verstärken und zweitens die Forschungsinstitute der Blauen Liste in den Wettbewerb um Fördermittel der DFG einbeziehen, dann ist es konsequent, daß sie auch Mitglieder der DFG werden, entweder einzeln oder wiederum als Gemeinschaft. Beides ist ja denkbar, wenn wir zu einer handlungsfähigen und etwas homogeneren WBL kommen.

Andererseits heißt es, die Finanzierung durch die DFG sei nur für eine Übergangsphase vorgesehen. Wenn erst einmal der Senat der Leibniz-Gemeinschaft etabliert sei, werde dieser die Mittel vergeben.

Auch das ist eine Möglichkeit. Wir haben sie von Anfang an ins Spiel gebracht, dann zunächst zurückgestellt, als die Institute sich zunächst einmal dem Wettbewerb in der DFG stellen wollten, sicherlich auch im Blick auf die Debatte über Sinn und Qualität der Blaue-Liste-Institute. Aber es besteht natürlich kein Grund, eine funktionsfähige Wissenschaftsgemeinschaft von Leibniz-Instituten anders zu behandeln als die HGF oder andere Wissenschaftsgesellschaften.

Welche Rolle spielten die Institute der Blauen Liste bei der wissenschaftlichen Transformation in Ostdeutschland?

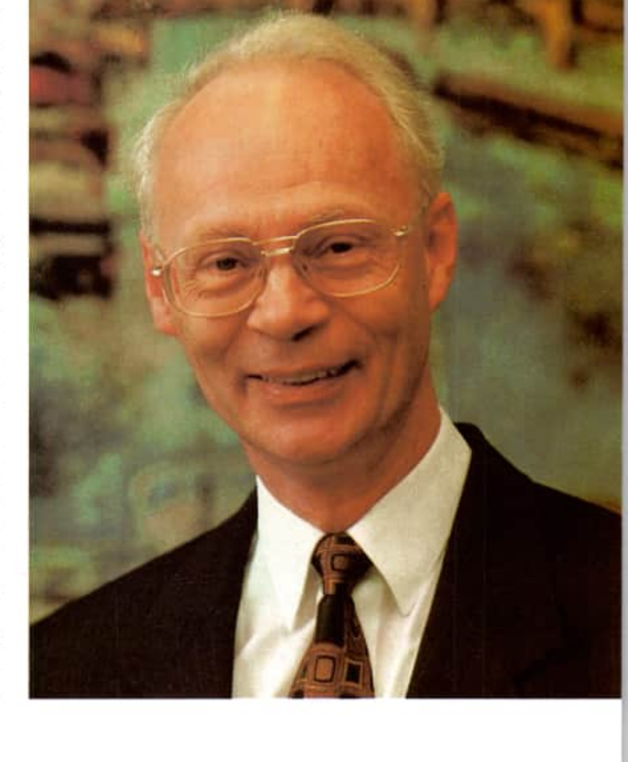
Es gab nicht schlechthin Bewahrung, sondern Bewahrung dessen, was sich als wertvoll erwies. Und da wurde ein harter Maßstab angelegt. Es ist nicht einfach etwas umgewandelt worden, sondern es haben lauter Neugründungen stattgefunden. Der Wissenschaftsrat mußte zu einem Instrument greifen, das vorhanden war; das waren die Institute der Blauen Liste.

Zahlreiche BL-Institute sind aus Teilen der Akademie der Wissenschaften der DDR hervorgegangen.

Der Bund war nicht bereit, in größerem Umfang Großforschungseinrichtungen im Osten zu etablieren. Man muß fairerweise hinzufügen, daß der Wissenschaftsrat das auch nicht wollte, denn damals war er mehrheitlich der Überzeugung, daß die Großforschungseinrichtungen eigentlich überlebte Fossilien aus einer anderen Zeit seien. Ich empfand es als faszinierend, wie sich bis 1995/96 die Vorstellung wieder in die andere Richtung wandelte.

Wie immer dem sei, für uns sind die Institute der Blauen Liste unverzichtbar. Wir benötigen dringend ihr ingenieur- und naturwissenschaftliches Potential als das Saatbeet für das, was in einem nächsten Schritt in der Industrieforschung in funktionsfähige Ergebnisse umgesetzt werden muß. Sonst sind wir in allem, was wir aufzubauen hoffen, von Ergebnissen in Westdeutschland abhängig. Und außerdem wäre es ein Verlust des wissenschaftlichen Leistungspotentials für ganz Deutschland, nicht nur für uns, wenn man die Institute der Blauen Liste nicht weiterführen würde oder sie nicht gegründet hätte.

Das Interview führte G. H. Altenmüller.



Hans Joachim Meyer, geboren 1936 in Rostock, studierte zunächst ab 1955 Rechts- und Staatswissenschaft in Potsdam-Babelsberg, wurde aber 1958 aus politischen Gründen exmatrikuliert. Nach einer Tätigkeit als Hilfsarbeiter im Lokomotivbau studierte er Anglistik/Amerikanistik und Geschichte an der Humboldt-Universität Berlin. Nach dem Diplom 1964, der Promotion zum Dr. phil. 1971 und der Habilitation zum Dr. sc. phil. wurde er 1982 zum Hochschuldozenten für Angewandte Sprachwissenschaft und 1985 zum außerordentlichen Professor an der Humboldt-Universität ernannt. Nach der Wende war er ab April 1990 der letzte Minister für Bildung und Wissenschaft der DDR. Seit dem 6. November 1990 ist er sächsischer Staatsminister für Wissenschaft und Kunst. Meyer war von 1952 bis 1961 und ist seit 1990 Mitglied der CDU. Nach verschiedenen Tätigkeiten in Gremien der katholischen Kirche ist er seit April dieses Jahres Präsident des Zentralkomitees der deutschen Katholiken. Seit Januar ist er Vertreter der Verwaltungskommission in der Wissenschaftlichen Kommission des Wissenschaftsrates und gehört dem Präsidium der Kultusministerkonferenz sowie den Senaten von HGF und MPG an.

Buchbesprechungen

David Deutsch:
Die Physik der Welterkenntnis. Auf dem Weg zum universellen Verstehen.
Aus dem Englischen von Anita Ehlers.
Birkhäuser, Basel 1996.
360 Seiten, DM 49,80.

Noch nie habe ich es erlebt, daß sich meine Einstellung zu einem Buch bei der Lektüre so radikal gewandelt hätte wie bei diesem: von überzeugter Zustimmung bis zu entschiedener Ablehnung.

Ohne weiteres zustimmen kann ich manchen wissenschaftstheoretischen Standpunkten des Autors: Erkenntnis ist grundsätzlich unsicher und wird es zwangsläufig bleiben. Insbesondere kann Induktion – der Schluß von gestern und heute auf morgen – keine Sicherheit bringen. Wie viele andere Naturwissenschaftler folgen sowohl David Deutsch als auch ich in diesem Punkt dem Philosophen Karl Popper (1902 bis 1994), der seine Wissenschaftstheorie in dem Satz „Wir wissen nicht, sondern wir raten" trefflich zusammengefaßt hat.

Mit uns glaubt der Autor, daß jemand, der vom Eiffelturm springt, zerschmettert wird, wenn er unten ankommt. Aber warum? Weil es in vergleichbaren Situationen immer so war? Das genügt Deutsch als überzeugtem Jünger Poppers nicht. Vielmehr sei die Begründung, daß die „besten" Theorien, die überhaupt über Sprünge vom Eiffelturm eine Aussage machen, dies implizieren. Die Erfahrung dürfe in den Schluß nur insofern eingehen, als sie mit solchen Theorien übereinstimmt.

Was aber macht die Qualität einer Theorie aus? Daß sie die Phänomene besser „erklärt" – und nicht nur vorhersagt – als andere. So weit bin ich einverstanden. Aber was ist eine gute Erklärung? Hier gleitet der Autor in extremen Subjektivismus ab: Er erkennt eine Theorie dann und nur dann als gültig an, wenn er – David Deutsch – sie versteht.

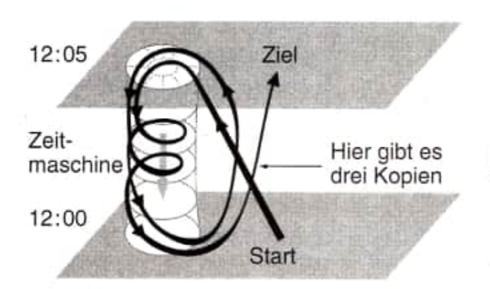
Hierzu ein Beispiel. Deutsch hängt der Viele-Welten-Interpretation der Quantenmechanik an (siehe seinen Artikel in Spektrum der Wissenschaft, November 1994, Seite 50). Das ist eine durchaus respektable, insbesondere von Kosmologen vertretene Vorstellung. Sie unterstellt, daß es zusätzlich zu dem einem Universum, in dem wir leben und das wir bewußt erfahren, praktisch unendlich viele parallele Universen gibt, in denen Doppelgänger von uns leben und die Deutsch zu einem – dem – Multiversum zusammenfaßt (Bild). Er vertritt seinen Standpunkt sehr entschieden: Es werfe „kein gutes Licht auf die Mehrheit dieser Zunft", daß nur eine Minderheit der Physiker von der Existenz des Multiversums überzeugt ist.

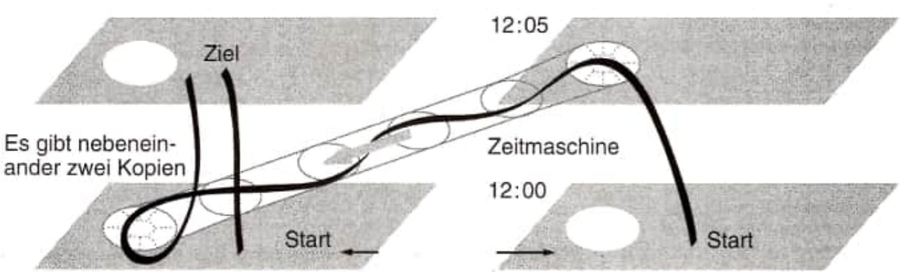
Im Buch spricht er von dessen Objekten so, als sei ihre Realität offensichtlich und nicht weiter zu hinterfragen – ein doch wohl allzu naiver Realismus. Die angeblich so schlecht belichtete Mehrheit der Physiker, mich eingeschlossen, hält jedoch die Viele-Welten-Interpretation für nichts weiter als eben dies: für eine Interpretation, die durch eine andere ersetzt werden kann, ohne daß dadurch beobachtbare Konsequenzen entstünden. Jede Interpretation ist ein Stück Metaphysik, nicht mehr. Wenn wir nun aber allen Welten des Multiversums Realität zusprechen sollen, verlieren wir zwangsläufig jeden Maßstab dafür, welche in einer „Erklärung" auftretenden Begriffe real existierende Objekte beschreiben und welche nicht.

Das aber kann nicht nur einer subjektiven, dem jeweiligen Einzelfall angepaßten Wahl überlassen bleiben. Denn Verständnis – eigentlich eine unordentliche Privatsache – kann mit unsinnigen Assoziationen einhergehen. Zumindest zum Zweck der gegenseitigen Verständigung brauchen wir also objektive Kriterien dafür, welchen Begriffen physikalische Realität entsprechen kann; und nach meiner Überzeugung hat sich das folgende Kriterium bewährt: Ein physikalischer Begriff ist dann und nur dann sinnvoll, wenn sich mit seiner Hilfe experimentell überprüfbare Sätze herleiten lassen, die ohne ihn nicht folgen.

Nach einer durchaus mageren Begründung seines Ausschließlichkeitsanspruchs vergleicht Deutsch seine Viele-Welten-Interpretation mit Galileo Galileis (1564 bis 1642) Anspruch von 1613, bewiesen zu haben, daß die Erde die Sonne umläuft, sich dreht und so weiter. An dieser Stelle wird exemplarisch deutlich, warum ich die späteren Thesen des Buches ablehne. Galileis Behauptungen waren eben Sätze, die seither durch zahlreiche Experimente überprüft und nicht widerlegt worden sind. Dem stand nicht entgegen, daß seine Experimente mit rollenden Stäben, die dem Anspruch zugrunde lagen, recht vage Ergebnisse hatten und daß ihr Anwendungsbereich beschränkt war.

Im Gegensatz dazu wurde die Viele-Welten-Interpretation von ihrem Erfinder Hugh Everett 1957 gerade so konstruiert, daß sie für die derzeit beobachtbaren Phänomene dieselben Konsequenzen hat wie die orthodoxe Kopenhagener Interpretation. Zu einer experimentell überprüfbaren naturwissenschaftlichen Theorie würde sie erst durch eine Bestätigung ihrer sensationellen Vorhersagen, die jedoch in ferner Zukunft liegen und die sogar David Deutsch der Science-fiction zurechnet: Zeitreisen in die Vergangenheit und Besucher aus der Zukunft. An diese sollen wir auf Grund der unbestätigten Viele-Welten-Interpretation genauso glauben, wie Galilei 1613 an die Drehung der Erde geglaubt hat.





David Deutsch betritt in einer simulierten Welt eine Zeitmaschine, die ihn fünf Minuten in die Vergangenheit befördert. Durch mehrfache Benutzung der Maschine entstehen beliebig viele gleichzeitig existierende Exemplare seiner Person (links). Deutsch löst alle damit verbundenen Paradoxa durch seine Theorie vom Multiversum auf (rechts): Die beiden Exemplare desselben Menschen, der gewöhnliche und der fünf Minuten ältere Zeitreisende, stammen aus parallelen Universen; aber das eine ist so real wie das andere.

Von Alan Turing (1912 bis 1954), einem der einflußreichsten Begründer der theoretischen Informatik, stammt das Prinzip der Turing-Maschine, eines hypothetischen Computers, der alles überhaupt durch eine Maschine Berechenbare berechnen kann. Deutsch erweitert dieses Prinzip nun dahingehend, „daß es möglich ist, einen Simulator zu bauen, dessen Repertoire jede physikalisch mögliche Umwelt enthält" (Seite 148). Und was möglich ist, findet auch statt – glaubt Deutsch.

Damit gerät er in die Debatte über die Gesamtmasse des Universums. Von dieser Größe hängt es nämlich ab, ob das Universum für immer expandieren oder wieder in sich zusammenstürzen wird. Unabhängig von allen Details ist zu vermuten, daß es vom endgültigen Schicksal des Universums abhängt, ob in ihm ein Simulator gebaut werden kann, in dessen Repertoire eben dieses Schicksal enthalten ist. Aber Deutsch ist ja von dieser Möglichkeit überzeugt; also schließt er, daß die Omegapunkt-Theorie, die Frank Tipler in seinem Buch „Die Physik der Unsterblichkeit" (Piper, München 1995) propagiert hat und die das endgültige Zusammenstürzen des Universums impliziert, korrekt sei. Womit denn auch die Frage nach der Gesamtmasse des Universums allein aufgrund des von Deutsch verallgemeinerten Turing-Prinzips entschieden wäre!

Vereint mit dem Darwinschen Prinzip der Evolution besagt das Turing-Prinzip laut Deutsch auch, daß der universelle Simulator tatsächlich gebaut werden wird. Bauen werden ihn unsere Nachfahren – Computer, auf denen das Programm des Lebens laufen wird, dessen Hardware heute noch wir bilden. Denn die Schranken, welche die biologische Hardware der Entwicklung von Intelligenz setzt, werden wir demnächst durch den Bau von Computern, die dem Leben das Leben abnehmen können, überwinden – mit dem Ergebnis, daß das biologische Lebens zugunsten des künstlichen abdanken wird. Wenn sich die Welt dem Omegapunkt nähert, wird es ohnehin kein biologisches Material mehr geben. Wir werden keinen körperlichen Nachfahren mehr haben, wohl aber einen geistigen in Gestalt eines – von heute aus gesehen – unermeßlich machtvollen Computerprogramms. Am Ende bleibt nur die Simulation.

Eine Weile ist es noch lustig, mit David Deutsch die Weiterungen seiner Prinzipien zu verfolgen, aber ab Seite 332 überwiegt entschiedene Ablehnung jede andere Regung: Eingekleidet in eine Besprechung des erwähnten Buches von Frank Tipler spekuliert unser Autor, daß „eine hinreichend fortgeschrittene Technologie eine Auferstehung der Toten" ermöglichen werde. Die unendlich weise Simulation am zeitlichen Ende des Multiversums könne jeden von uns als Teil ihrer selbst auferstehen lassen.

Ich breche ab. David Deutsch, der heute an der Universität Oxford über Quantencomputer und -kryptographie arbeitet, ist ein ausgewiesener, von vielen als brillant beschriebener Vertreter einer neuen Wissenschaft, der Quanteninformatik. Von ihm stammen einflußreiche Arbeiten, so daß ich bereit bin, ihm ein Stück weiter zu folgen als anderen. Bis zur Auferstehung der Toten aber nicht – nicht bis in die Esoterik-Abteilungen der Buchhandlungen.

Der unsägliche Schluß des Buches diskreditiert auch viele der glänzend formulierten, für manche Leser vermutlich provokanten Einsichten, die sich wieder und wieder in dem Buch finden. So ist (Seite 233) „die Beweistheorie kein Zweig der Mathematik, sondern ein Zweig der Naturwissenschaft". Vorstellbar ist (Seite 240), „daß die euklidische Geometrie oder die aristotelische Logik irgendwie in den Bau unserer Gehirne eingebaut ist, wie Immanuel Kant dachte. Aber deshalb müssen sie nicht aus logischen Gründen wahr sein". „Darwin konnte darüber staunen, daß Naturgesetze, die Elefanten überhaupt nicht erwähnen, sie trotzdem erzeugen, genau wie Newtons Gesetze Ellipsen erzeugen, ohne sie zu erwähnen" (Seite 322).

Nur gelegentlich und sehr kursorisch beschreibt Deutsch die physikalischen Grundlagen seiner weitreichenden Annahmen. Nichts findet sich zur quantenmechanischen Verschränktheit von Zuständen mehrerer Teilchen, welche die anschauliche Interpretation der Quantenmechanik vereitelt und dadurch erst den Anlaß zur Entwicklung der Viele-Welten-Interpretation gegeben hat. Das Literaturverzeichnis erwähnt weder die grundlegenden Arbeiten von Albert Einstein, Boris Podolsky und Nathan Rosen aus dem Jahr 1935 noch die Folgerungen, die John Bell ab 1964 aus ihnen gezogen hat (Spektrum der Wissenschaft, September 1992, Seite 82) – für einen Physiker, der überzeugen, nicht nur überreden will, eine merkwürdige Auslassung!

Bei aller Ablehnung der extravaganten Folgerungen: Ich empfehle das Buch dem kritischen Leser, der Spaß an provokativ formulierten Einsichten und Spekulationen hat. Allerdings sollte man vieles nicht ganz so ernst nehmen, wie Deutsch es tut. Schlimm wäre es allerdings, wenn das Buch wie andere Auferstehungsbücher, die in Folge von Tiplers Werk publiziert wurden, von Esoterikern vereinnahmt würde, wenn die esoterisch angehauchten Spekulationen in unmittelbarer Nachbarschaft wissenschaftlich korrekter Erörterungen den Eindruck erweckten, die Möglichkeit der Auferstehung sei wissenschaftlich erwiesen. Das ist sie selbstverständlich nicht und wird es nach meiner Überzeugung nie werden.

Prof. Dr. Henning Genz
Institut für Theoretische Teilchenphysik,
Universität Karlsruhe.

Gert Lange:
Sonne, Sturm und weiße Finsternis. Die Chronik der ostdeutschen Antarktisforschung.
Ernst Kabel, Hamburg 1996.
336 Seiten, DM 68,–.

Wissenschaft und Forschung standen in der DDR in hohem Ansehen. Das galt in den achtziger Jahren in besonderem Maße für die Erkundung der Antarktis, nachdem die DDR gleichberechtigtes Mitglied des Antarktis-Vertrages (demgemäß der siebente Kontinent seit 1961 internationaler kernwaffenfreier Gemeinschaftsraum mit hohen Naturschutzstandards ist) und des Scientific Committee for Antarctic Research geworden war. Zuvor hatte sie sich zwanzig Jahre lang an sowjetischen Antarktis-Expeditionen beteiligt; ostdeutsche Wissenschaftler trugen zunehmend zu deren Ergebnissen bei.

Gert Lange hat nun eine sehr schöne Chronik der ostdeutschen Polarforschung von 1959 bis heute vorgelegt. Der Wissenschaftsjournalist hat die Forscher und Techniker immer wieder in der Antarktis (und in der Arktis) sowie in ihren Instituten besucht und befragt (vergleiche Spektrum der Wissenschaft, Dezember 1992, Seite 128, September 1993, Seite 104, Juni 1994, Seite 119, und März 1996, Seite 14). Er hat ihnen aber auch geholfen, nach jeder Expedition ihre Erlebnisse und wissenschaftlichen Erfahrungen in verständlicher und anschaulicher Form zu beschreiben. Dreißig solcher Artikel, erläutert und verknüpft durch kurze Zwischentexte Langes, erschienen 1982 beim VEB F. A. Brockhaus in Leipzig unter dem Titel „Bewährung in Antarktika"; das damals schnell vergriffene Werk ist im ersten





Rotes Polarlicht (links) ist auch in der Antarktis selten. Die – nur in Ausnahmefällen sichtbaren – Strahlen zeichnen die Feldlinien des in die Erdatmosphäre einfallenden Magnetfelds nach. Das sogenannte Pfannkucheneis (oben) auf antarktischem Gewässer ist ein Anzeichen für den beginnenden Winter und für die Expeditionsschiffe der Anlaß zu eiligem Aufbruch.

Teil des neuen Buches fast unverändert nachgedruckt.

Geschildert werden darin Leben und Arbeit auf den sowjetischen Expeditionen, aber auch Schwierigkeiten, Gefahren und menschliche Herausforderungen. Im monate- und vielfach jahrelangen Zusammenleben auf engstem Raum waren mitunter persönliche Freundschaften gewachsen, die weit über die verordnete deutsch-sowjetische Bruderschaft hinausgingen. Kritik an den sowjetischen Gastgebern und Partnern sowie an den deutschen Organisatoren fehlt selbstverständlich ebenso wie eine nüchterne Darstellung der ökonomischen Schwierigkeiten und politischen Einschränkungen, unter denen die zum Teil hervorragenden wissenschaftlichen Ergebnisse erzielt wurden. Nur in seine Zwischentexte hat Lange nachträglich einige kritische Hinweise eingearbeitet.

Die Beiträge aus den achtziger und frühen neunziger Jahren zeigen den Übergang in eine nicht nur wissenschaftlich, sondern auch logistisch eigenständige Antarktis-Forschung der DDR. In einem eigenen Artikel behandelt Lange abschließend die Verschmelzung der ost- mit der westdeutschen Polarforschung. Sie gelang ohne allzugroße Schwierigkeiten, weil unsere Kollegen in der DDR sich auf geowissenschaftliche Untersuchungen des Kontinents konzentriert hatten, wir in der Bundesrepublik hingegen auf das Südpolarmeer. Dieser fachlichen Trennung wurde dadurch Rechnung getragen, daß in der Forschungsstelle Potsdam des Alfred-Wegener-Instituts die terrestrischen und atmosphärenphysikalischen Arbeitsgruppen zusammengefaßt und in der Bremerhavener Zentrale die Meeresforscher verblieben sind.

Die Georg-Forster-Station der DDR konnte allerdings nicht auf die Dauer neben der wohlausgestatteten und geographisch günstiger gelegenen Forschungsbasis „Neumayer“, seit 1992 Nachfolgerin der nach elf Jahren Betrieb im Eis versunkenen Georg-von-Neumayer-Station, erhalten bleiben. Sie wurde einschließlich jahrzehntealter Müllberge in einem ökologisch vorbildlichen, wirtschaftlich und logistisch äußerst aufwendigen Unternehmen abgebaut und entsorgt; das schildert Lange unter dem Titel „Das große Reinemachen“.

Auf die neuen Aufgaben der ostdeutschen Forschergruppen geht der Direktor des Alfred-Wegener-Instituts, Max Tilzer, in einem informativen Vorwort ein.

Lange läßt die 42 Polarforscher nicht nur von ihrem eher entbehrungsreichen als abenteuerlichen Leben erzählen; sie vermitteln auch gute Einblicke in ihre wissenschaftlichen Fragen und Methoden. Im Vordergrund steht dabei die Geophysik der festen Erde, die hochgenaue Geodäsie, die für das Erfassen der Eismassen-Dynamik unerläßlich ist. Ebenfalls breiten Raum nehmen die Meteorologie sowie die Physik und Chemie der hohen Atmosphäre ein. Die deutschen Ozon-Messungen gewannen später große Bedeutung wegen der rapiden Vergrößerung des stratosphärischen Ozonlochs über der Antarktis. Zudem wurden geologische und schließlich auch biologische Fragen von kleinen Forschungsgruppen behandelt, die sich in verschiedenen sowjetischen Stationen einquartierten und an langen Schlittenzügen und Flugunternehmungen teilnahmen.

In einem klugen Nachwort reflektiert Lange seine Rolle als Journalist, der wissenschaftliche Erkenntnisse und Ideen publik machen will. Das ist ihm mit dieser Chronik eines wichtigen Stückes deutscher Wissenschaftsgeschichte gelungen. Vor allem ist dies aber ein schönes, informatives und in vielen Passagen spannendes Lesebuch. Einige der jeweils etwa fünf Seiten langen Aufsätze sind inhaltlich und stilistisch zu den großen Zeugnissen der heroischen Zeit der Polarforschung zu zählen. Mich freut besonders, daß hier ein in Umfang und Anlage ähnliches ostdeutsches Pendant zu „Biologie der Polarmeere“ (Jena 1995) erschienen ist, das ich mit herausgegeben habe (besprochen in Spektrum der Wissenschaft, Dezember 1996, Seite 128).

Sehr verschiedene Kreise von Lesern, nicht nur Lehrer und interessierte Laien, sondern auch Schüler und Studenten können daraus Gewinn und Genuß schöpfen. Und weil das Alfred-Wegener-Institut und das Deutsche Schiffahrtsmuseum die Herausgabe gefördert haben, ist der Preis für das vorzüglich aufgemachte und drucktechnisch ansprechende Buch durchaus erschwinglich.

Prof. Dr. Gotthilf Hempel
Zentrum für Marine Tropenökologie, Bremen.

Robert M. Julien:
Drogen und Psychopharmaka.
Aus dem Englischen
von Therese Apweiler
und Stefan Hartung.
Spektrum Akademischer Verlag,
Heidelberg 1997.
564 Seiten, DM 68,–.

Dies ist die deutsche Fassung einer in den Vereinigten Staaten seit 1975 in sieben Auflagen erschienenen, offenbar sehr erfolgreichen Monographie „A primer of drug action: a concise, nontechnical guide to the actions, uses and side effects of psychoactive drugs". Der Verfasser Robert M. Julien ist Pharmakologe und Anästhesist in Portland (Oregon).

Schon der knappe deutsche Titel wirft eine der bei der Übersetzung wissenschaftlicher Texte auftretenden terminologischen Fragen auf. Denn dem englischen *drugs* entspricht keineswegs der deutsche Begriff Drogen. Darunter versteht man – in Abwandlung der ursprünglichen, für Produkte pflanzlichen und tierischen Ursprungs verwendeten Bezeichnung – allgemein als Suchtmittel mißbräuchlich verwendete psychoaktive Substanzen, natürliche wie synthetische. Zu den in der Therapie mentaler Störungen verwendeten Arzneimitteln bestehen freilich vielfältige Übergänge.

Das Buch ist klar gegliedert. Außer den klassischen Suchtmitteln wie Opiaten (Heroin), Psychostimulantien (Cocain, Amphetaminen) und Alkohol behandelt Julien auch Haschisch (Cannabis), Halluzinogene wie LSD, Coffein und Nikotin. Die Darstellung der Psychopharmaka folgt der klassischen Einteilung in Neuroleptika, Antidepressiva (einschließlich Lithium) und Anxiolytika (Benzodiazepine). Außerdem werden Schlafmittel, anabole Steroide und Anti-Parkinson-Mittel besprochen.

Nach einem historischen Rückblick erläutert Julien in den einzelnen Kapiteln die pharmakologischen und toxikologischen Wirkungen jeder Stoffgruppe, bei den Psychopharmaka auch deren klinische Anwendung. Informationen über die in Deutschland zugelassenen Präparate und deren Dosierung sind eingefügt. Diagramme, Skizzen und Tabellen ergänzen den Text.

Die Literaturangaben zu den einzelnen Stoffgruppen verweisen weitgehend auf amerikanische Arbeiten; hier und dort wurde versucht, sie durch deutsche zu ergänzen. Ein Fragenkatalog zur Überprüfung des vermittelten Wissens beschließt die einzelnen Kapitel – etwas ungewöhnlich bei einem Werk, das weit

mehr als ein Skript für Studenten sein will und auch ist.

Eingeleitet wird das Buch mit einer Einführung in die Grundlagen der Pharmakokinetik und Pharmakodynamik; ein Anhang vermittelt das für das Verständnis der Funktionen des Zentralnervensystems wichtigste anatomische und physiologische Basiswissen. Ausführlich behandelt Julien die mit einzelnen Substanzgruppen verknüpfte Suchtproblematik einschließlich der Aspekte der Prävention, wobei die Verhältnisse in den USA weitgehend die Darstellung bestimmen. Verschiedentlich haben die Bearbeiter der Übersetzung Bemerkungen zur deutschen Situation eingefügt. Ein eigenes Kapitel behandelt gesellschaftliche Probleme des Drogenmißbrauchs.

Das Buch ist flüssig geschrieben und leicht lesbar. Dies ist auch ein Verdienst der Übersetzer. Kaum einmal wird man daran erinnert, daß es sich um einen ursprünglich fremdsprachlichen Text handelt. Das manchmal nicht einfache Problem der adäquaten Übertragung von Fachausdrücken ist in aller Regel befriedigend gelöst. Ein ausführliches Glossar und ein umfangreiches Stichwortverzeichnis erleichtern den Gebrauch als Nachschlagewerk.

Aufgrund des breiten Themenspektrums und wegen der großen Aktualität des Suchtproblems wird das Buch auf breite Resonanz stoßen. Dank der leicht verständlichen Darstellung dürften auch nicht einschlägig Vorgebildete kaum überfordert sein. So ist dem Werk eine Verbreitung weit über den engeren medizinischen Bereich hinaus zu wünschen. In sozialen Diensten und in der Rechtspflege Tätige, aber auch Journalisten, Publizisten und Politiker können daraus wesentliche Informationen beziehen, zumal für die gegenwärtige erbitterte Diskussion über Strategien zur Bewältigung des Drogenproblems, das einzudämmen derweil immer dringlicher wird.

Prof. Dr. Albert Herz
emeritierter Direktor
der Abteilung Neuropharmakologie,
Max-Planck-Institut für Psychiatrie,
München.

Karen Gloy:
Das Verständnis der Natur. Band II: Die Geschichte des ganzheitlichen Denkens.
C. H. Beck, München 1996.
276 Seiten, DM 48,–.

Philosophiegeschichten und Werke zur Geschichte der Naturwissenschaften gibt es in Fülle. Neu dagegen ist ein Buch zur Geschichte des ganzheitlichen Denkens. Karen Gloy, Philosophie-Professorin in Luzern mit Arbeitsschwerpunkt Naturphilosophie und antike Philosophie, wollte das heutige ökologische Denken nicht allein als eine Antwort auf Umweltkrisen sehen, sondern nach seinen historischen Wurzeln suchen.

In ihrem Buch trennt sie sehr strikt zwischen dem ökologisch-ganzheitlichen Denken einerseits und dem naturwissenschaftlich-mechanistischen andererseits. Seit der Renaissance, die noch durch ein einheitlich naturphilosophisches Weltbild geprägt gewesen sei, hätten sich beide Denkweisen zunehmend voneinander entfernt.

Naturwissenschaftlern mag an manchen Stellen diese scharfe Trennung als zu drastisch erscheinen. Denn viele betreiben ihre Tätigkeit mit einer durchaus emotionalen Komponente, gerade weil sie die Natur bewundern. Einseitigkeit kann man der Autorin jedoch nicht vorwerfen, denn den ersten Band der Reihe „Das Verständnis der Natur“ hat sie gerade der Geschichte des naturwissenschaftlichen Denkens gewidmet.

Einer der Denker, die sie noch als Grenzgänger zwischen naturwissenschaftlichem und ganzheitlich-spekulativem Denken einstuft und entsprechend ausführlich behandelt, ist Joseph von Schelling (1775 bis 1854), auch als der „Philosoph der Romantik“ bezeichnet. Während er sich in jungen Jahren vorwiegend mit Naturphilosophie beschäftigte, kennzeichnet seine Spätphase der Versuch, Mythologie und Offenbarung zu durchdringen und zu denken. Dementsprechend berufen sich jene, die – wie etwa Anhänger der New-Age-Bewegung – nach ihrem eigenen Anspruch Gegenkonzepte zur Moderne vertreten, auf das späte, „moderate“ Naturwissenschaftler auf das frühe Werk Schellings.

Moderat nennt die Autorin diejenigen, die an den Resultaten und Methoden der exakten Naturwissenschaften festhalten, dabei aber versuchen, sie in ein umfassenderes Konzept zu integrieren – wie zum Beispiel Schelling. Dieser betrachtete die ganze Natur als lebendigen Organismus, der Stufen höherer Entwicklung in einer Art Selbsterkenntnis durchläuft. Alles, was ist, so Schelling, ist wegen seiner gemeinsamen Herkunft aus dem Absoluten an sich identisch und unterscheidet sich nur in seiner Erscheinungsweise, in der sich die jeweilige Organisationsstufe ausdrückt.

Über die Frage, ob diese Organisationsstufen nur eine methodologische Rekonstruktion darstellen oder ihnen Realität zukomme, kam es 1801/1802 zum Bruch zwischen Schelling und Johann Gottlieb Fichte (1762 bis 1814). Schelling hielt an der Selbständigkeit der Natur fest, während Fichte das absolute Ich oder den Verstand zum alleinigen Prinzip erhob, woraus die Natur in einem aktiven Prozeß erschaffen worden sei.

Von der dauernden Entwicklung und Bewegung her denkend, hielt Schelling nicht das Lebendige, sondern das Tote für erklärungsbedürftig und vom Lebendigen her zu verstehen. In einer radikalen Denkweise des 20. Jahrhunderts mündet dies in die Forderung, nicht Biologie auf Physik und damit auf mechanische Prozesse, sondern Physik auf Biologie zu reduzieren. Heute werfen Naturwissenschaftler mitunter Schelling ein nicht exakt mathematisch-naturwissenschaftliches Denken vor; „arrogant und spekulativ“ nannte es der Chemie-Nobelpreisträger Ilya Prigogine. Vielleicht hat die spätere Interpretation durch die Romantik Schelling in Mißkredit gebracht. Was die wissenschaftlichen Erkenntnisse seiner Zeit betrifft, so war er auf der Höhe.

Außer Schelling bespricht die Autorin in ihrem Gang durch die Geschichte als weiterführende Bewahrer der Tradition Gottfried Wilhelm von Leibniz (1646 bis 1716), Friedrich Hölderlin (1770 bis 1843) und Novalis (1772 bis 1801).

Als Weisen ganzheitlichen Denkens im 20. Jahrhundert behandelt sie Vitalismus, Holismus, New Age und Ökologie. Dabei geht sie stärker auf die spekulativen Denkweisen ein als auf solche, die sich wirklich zwischen Naturwissenschaften und Naturphilosophie befinden. Der von der New-Age-Bewegung absorbierte Fritjof Capra wird erwähnt, James Lovelock und Lynn Margulis kommen am Rande vor als Vertreter der Gaia-Hypothese, welche die Erde als ein sich selbst regulierendes System – einem Organismus ähnlich – betrachtet. Grenzgänger wie der Mathematiker und Philosoph Alfred North Whitehead (1861 bis 1947) werden überhaupt nicht erwähnt, obwohl er, der für ein Naturverständnis aus der Dynamik, nicht aus der Statik heraus plädierte, sich gut in den Zusammenhang des Buches eingefügt hätte.

Karen Gloy löst in den historischen Passagen in respektabler Weise den Anspruch ihres Buches ein, die Traditionen des ganzheitlichen Denkens aufzurollen.

Der letzte Abschnitt über Ökologie und Gentechnologie dagegen, in dem sie eine Art Moral aus der Geschichte dieses Denkens zu ziehen versucht, ist schwächer. Was sie als den freiheitlich subjektivistischen Standpunkt bezeichnet und vertritt, ist ein wohlfeiles Einerseits-Andererseits: Sie plädiert für eine kompromißbereite Sichtweise, für eine „Forschung mit Geschwindigkeitsbegrenzung". Als kompromißbereit gilt, wer Stellung beziehen kann, ohne fundamentalistisch in einem beispielsweise religiösen Regelsystem verankert zu sein, wer manches, aber nicht alles machen will, was machbar ist. Ratsamer, als stur auf einem Standpunkt zu verharren, sei es, dynamisch von Fall zu Fall zu entscheiden und so die Entwicklung des Ganzen im Auge zu behalten.

Das ist so ausgewogen, daß es gar nicht falsch sein kann. Hat am Ende der gelungene historische Abschnitt nur als Wegbereiter für schon allzu oft Gesagtes gedient? Zwischen den Zeilen des Schlußabschnittes steckt ein politisches Pamphlet, und zwar von der billigsten Sorte: Computer schaden uns, Ingenieure und Mathematiker sind böse Menschen, und alle zusammen sind sie am Tod der Bäume schuld.

Ich glaube schon, daß es angesagt ist, (wieder) ganzheitlich denken zu lernen – aber zur Ganzheit gehören eben auch die bösen Menschen.

Dr. Sabine Stöcker
Abteilung für Mathematik,
Polytechnikum Turin (Italien).

Helmut Schwab:
Süßwassertiere.
Ein ökologisches Bestimmungsbuch für Kinder, Lehrer, Eltern und alle Naturfreunde.
Klett, Stuttgart 1995.
320 Seiten, DM 42,80.

Dieses Buch ist zwar in einem Schulbuchverlag erschienen, aber nicht nur für den Unterricht vorgesehen; es wendet sich ebenso an interessierte Laien, und selbst Fachleute können manch wertvollen Hinweis finden. Es ist einfach zu handhaben, sehr übersichtlich aufgebaut und folgt streng einem wohldurchdachten Prinzip. Durch zahlreiche Photographien und Schemazeichnungen bekommt der Benutzer ein anschauliches Bild der ökologischen und artspezifischen Zusammenhänge. Vor allem die Makroaufnahmen machen neugierig und regen zu näherer Auseinandersetzung an.

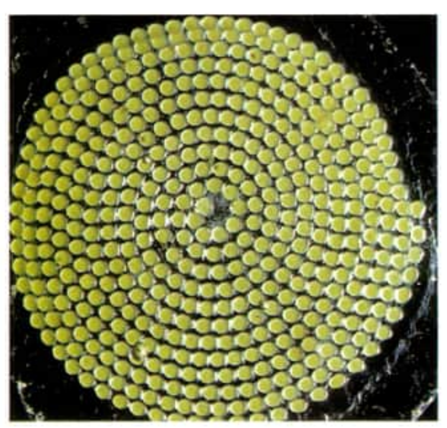
Nach einem allgemeinen Teil über Wasserkreislauf, Stoff- und Energiehaushalt in Gewässern, Sauerstoff- und Kohlendioxid-Kreislauf eines Sees, verschiedene Gewässertypen und anthropogene Einflüsse folgt ein ausführlicher Teil über alle häufig vorkommenden und leicht zu erkennenden wirbellosen Süßwassertiere, von den Schwämmen, Würmern, Krebsen und Spinnen über die Vielfalt der Insekten bis zu den Muscheln. Ein zweiter, ebenso ausführlicher Teil ist – über die Abgrenzung im Titel hinaus – den Kleinstlebewesen gewidmet: Bakterien und Algen sowie anderen Einzellern. Es folgt eine sehr geraffte Übersicht der Klassen von Wirbeltieren, die im und am Wasser leben.

Zum Schluß gibt Helmut Schwab, Biologe in der Gewässerdirektion Neckar, Hinweise zum Fangen und Bestimmen der beschriebenen Tiere, Anlei-

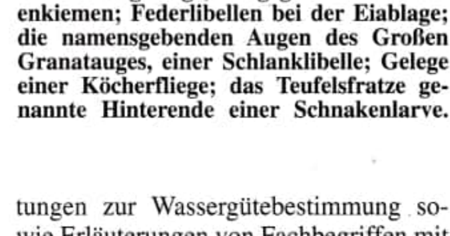












Von oben nach unten: Larve des Gelbhaft, einer Eintagsfliege, mit gegabelten Tracheenkiemen; Federlibellen bei der Eiablage; die namensgebenden Augen des Großen Granatauges, einer Schlanklibelle; Gelege einer Köcherfliege; das Teufelsfratze genannte Hinterende einer Schnakenlarve.

tungen zur Wassergütebestimmung sowie Erläuterungen von Fachbegriffen mit weiterführenden Hinweisen.

Der Aufbau des Buches macht es sehr leicht, die zu bestimmenden Organismen zu finden und zuzuordnen. Eine Übersicht liefert zunächst den Hinweis auf die Gruppe. Auf der zugehörigen Seite findet man eine kompakte, mit Schemazeichnungen angereicherte Information über deren Verbreitung, Anatomie, Morphologie, Entwicklung und Verhalten. Hervorzuheben ist in diesem Zusammenhang der Steckbrief am Ende jedes Kapitels.

Dem Gruppenbild folgt schließlich die Beschreibung der jeweils wichtigsten Arten. Mehr als 500 Photos erleichtern die Zuordnung der zu bestimmenden Organismen und vermitteln eine gute Vorstellung auch von denen, die schwieriger zu beobachten sind. Wer dem Benutzerhinweis am Anfang des Buches folgt, erkennt anhand der Symbolik auf den ersten Blick Häufigkeit, Bedeutung als Leitorganismus für die Beurteilung der Gewässergüte und Belastungsfähigkeit des jeweiligen Tieres. Konzise sind Gruppenmerkmale, Lebensraum und Lebensweise beschrieben; es finden sich weitere interessante Hinweise zur Art.

Es macht Spaß, mit dem Buch umzugehen, ob in der Schulklasse, im Verein oder privat. Anregungen gibt es viele. Die Wirbeltiere hat Schwab allerdings – entsprechend der Zielsetzung seines Buches – sehr knapp abgehandelt.

Dr. Petra Sonnemann
Studienrätin für Biologie und Geographie in Wolfsburg und Naturschutzbeauftragte des Landkreises Gifhorn.

John Horgan:
An den Grenzen des Wissens. Siegeszug und Dilemma der Naturwissenschaften.
Aus dem Amerikanischen von Thorsten Schmidt.
Luchterhand, München 1997.
464 Seiten, DM 48,–.

Zaghaft überschreibt der Verlag das Buch mit „An den Grenzen…“, wo doch das Original 1996 mit der aufdringlichen Fanfare „The End of Science“ ein Kassenschlager in den USA wurde. Mit der Wissenschaft seien wir also ans Ende gelangt? John Horgan ist ein angesehener, gebildeter und oft unkonventioneller Journalist, langjähriger Redakteur des Scientific American, bis er dort – wegen dieses Buches – den Hut nehmen mußte. Bekannt und preisgekrönt wurde er durch intellektuell anspruchsvolle Interviews mit führenden Wissenschaftlern, in denen er Resultate und Stil der Forschung sezierte, besonders jedoch die Wirkungen naturwissenschaftlichen Tuns und mathematischen Nachdenkens auf unsere Gesellschaft, die Philosophie, auf heutige Erkenntnis und die Vorstellung vom Universum und vom Menschen.

Horgan sammelt in seinem Buch diese Gespräche und knüpft sie – mit geschickten und faßlichen Einleitungen – zum Grabgebinde. Alle heutige Wissenschaft stoße an ihr Ende: Wissenschaftstheorie, Physik samt Kosmologie, Chaostheorie, die Erforschung biologischer Evolution – sogar die Sozialwissenschaften! Jede dieser Disziplinen erhält ein Kapitel; dort trifft man auf Steven Weinberg, John Eccles, Noam Chomsky, Mitchell Feigenbaum und gut zwei Dutzend weitere Berühmte. Bis auf den in Texas befragten Belgier Ilya Prigogine sind Kontinentaleuropäer nicht vertreten.

Akribisch, meist mit freundlicher Anerkennung, aber auch spöttisch, manchmal bewußt respektlos schildert er seine Partner, ihr privates Milieu, ihre Einsichten und Absichten. Aus dem Olymp entführt er die Halbgötter; Dämmerung umfängt sie allenthalben und Melancholie.

Wer sich dieser Friedhofsstimmung entzieht, dem bietet Horgan einen durchaus lebendigen, persönlichen Eindruck von den Grenzen heutiger Forschung und von vielen ihrer führenden Vertreter – immerhin! Schließlich wäre es ja ein beachtlicher Erfolg, die Erkenntnis bis an die – angeblich prinzipiellen – Grenzen getrieben zu haben. Aber weiter gehe es nun nicht mehr; aller künftige Fortschritt sei triviale Ingenieuranwendung ohne Tiefe, ohne Bedeutung, nur noch unwesentliche Einzelheiten. Wie schade.

Endzeitstimmungen scheinen unwiderstehlich zu reizen, nicht nur heute und nicht nur bei alternden Weisen. Max Planck (1858 bis 1947) wurde vor dem Physikstudium gewarnt, es gäbe bei dem endgültigen Erfolg der allumfassenden klassischen Physik bestenfalls noch klei-

ne unergiebige „Schmutzecken". Ein falscher Rat, denn aus solchen Ecken ungeordneten Schmutzes entstand – unter Plancks Beteiligung – die Quantentheorie! Horgan erwähnt anfangs auch diese immer wiederkehrenden Untergangsvisionen, von Francis Fukuyamas modernem „Ende der Geschichte" bis zurück zum abendländischen Oswald Spengler. Die eigentlich recht lehrreiche Anekdote von der Schmutzecke fehlt bei Horgan, dafür erscheint Max Planck gemeinsam mit Woody Allen als Zeuge der Ansicht, das eigentliche Rätsel der Naturwissenschaften liege beim Menschen selbst. Für Horgan ist also das Bewußtsein kritischer Schlüssel und unerreichbares Ziel der gesamten wissenschaftlichen Mühen.

Woher rührt diese Verliebtheit in solchen Endzeit-Pessimismus? Einerseits von dem Stolz, ein abgeschlossenes und vom Nachwuchs nicht mehr erweiterbares Gebäude geschaffen zu haben. Wer in Vortrag und Lehrbuch, in Vorlesung und Prüfung nach einem solchen System strebt, wird leicht und ganz gern Opfer dieses ja doch arroganten Anspruchs einer Finalität. In den USA herrscht zudem jetzt eine verzweifelte Bedrängnis, gerade bei Horgans Zeugen. Anwendbares Wissen allein ist überall gefordert, selbst vom staatlichen Förderer. Gelder für die Höchstenergiephysik und deren kilometerlange Beschleunigertunnel wurden brüsk gestrichen. Diese Physiker verlieren nun ihre Werkzeuge und damit die Grundlage dafür, mit ihrem Wissen die eigentlichen Naturphilosophen zu bleiben – welch bittere Entthronung!

Forscher der zweiten Hälfte unseres Jahrhunderts sind enttäuscht, trotz all ihrer neuen Methoden nicht mit den Vorgängern, den Schöpfern der frühen Quantenphysik oder der Relativitätstheorie, mithalten zu können. Es fehlen heute die überzeugend einfachen und deshalb so tiefgreifenden Folgerungen, wie es die Unschärferelation, die Verknüpfung von Masse und Energie oder das Atommodell für eine breite Öffentlichkeit waren. Solche entmutigenden Stimmungen erwachsen natürlich besonders in den USA. In Berkeley und an der Columbia-Universität schmerzt der Maßstab aus dem alten Cambridge und weiland Göttingen; das spürt man in vielen der Gespräche.

Der Untertitel der deutschen Ausgabe lautet „Siegeszug und Dilemma der Naturwissenschaften". Ganz recht, denn gerade der Siegeszug der letzten Jahrzehnte ist Ursache des Innehaltens und des Pessimismus. Neue Provinzen zur Eroberung sind eben nicht klar erkennbar.

Ein treffendes Beispiel ist das Einordnen der Elementarteilchen. Ich entsinne mich noch der schieren Hoffnungslosigkeit mancher Hochenergiephysiker vor ungefähr dreißig Jahren. Man könne wohl niemals die den Atomkern zusammenhaltenden starken Kräfte verstehen, trotz aller massiven Experimente und vielfacher theoretischer Ansätze. Das menschliche Gehirn funktioniere nun einmal nicht gemäß diesen Kernkräften, also sei ein Zugang grundsätzlich unmöglich. Diese rein psychologisch-physiologisch befüchtete Grenze aber wurde überschritten. Die Quantenchromodynamik liefert mit den gebrochenzahlig elektrisch geladenen Quarks und einer tiefen Einsicht in die Symmetrien von Teilchen und Kräften beeindruckende Erklärungen. Selbstverständlich behandelt Horgan dieses Thema ausführlich.

Die Vereinigung naturwissenschaftlicher Beschreibungen für viele scheinbar unzusammenhängende Erscheinun-

gen unter dem Dach einer umfassenden Theorie ist hehres Idealziel der Forschung. Isaac Newton (1643 bis 1727) wurde gefeiert, denn sein fallender Apfel und die Planetenbewegungen gehörten plötzlich zusammen. Überschwengliche Gedichte wurden verfaßt, als James Clerk Maxwell (1831 bis 1879) im vorigen Jahrhundert die Vereinigung von elektrischen, magnetischen und optischen Phänomenen unter den Anweisungen eines Quartetts eleganter Gleichungen gelang. In unserer Zeit glückte die Vereinigung der physikalischen Kräfte, ein enormer Erfolg, auch wenn bis heute die Schwerkraft sich hartnäckig sträubt, mit den anderen Kräften, der starken, der schwachen und der elektromagnetischen, eingemeindet zu werden. Auf diesen Siegeszug der zeitgenössischen Theorie mußte einfach Innehalten und Verschnaufen folgen; das endgültige Finale ist aber wohl nicht zu fürchten. Man sollte nie nie sagen, erst recht nicht, wenn einem das Haar ergraut ist – was bei den meisten Partnern Horgans wohl zutrifft.

Fast noch imposanter als die Verschmelzung der Kräfte und die neue Ordnung der Teilchen ist die Verbindung des Verstehens vom All und seiner Entwicklung mit der elementaren Physik. Urknall und Einheit der Wechselwirkungen gehören zusammen. Mit dem Abkühlen der Welt brechen die Symmetrien, neue Vielfalt entsteht. Dazu passen dann auch wieder die eindrucksvollen Experimente wie die von Arno Penzias, als er beim technischen Überprüfen einer Radioantenne den Urknall nachwies – spannend von Horgan festgehalten (Spektrum der Wissenschaft, Dezember 1990, Seite 104).

Unbehagen äußert mancher Kritiker am Zerlegen und Zerteilen, dem Suchen nur nach kleinsten elementaren Einheiten. Die Wissenschaft verliere so den Blick und Sinn für das Ganze, das Zusammenwirken und das Komplexe. Murray Gell-Mann, von Horgan als Quark-Meister gelobt und als typischer Reduktionist vorgestellt, schrieb das Buch „Das Quark und der Jaguar" (Spektrum der Wissenschaft, März 199, Seite 121), in dem er diesen Gegensatz zwischen dem Teil und dem Ganzen zu erläutern versuchte. Das Komplexe sei zu schwierig, Fortschritt könne wohl doch nur von weiteren Vorstößen in den Mikrokosmos erwartet werden, so zitiert Horgan den Pessimismus von Gell-Mann.

Was uns Naturwissenschaftler sicherlich auch quält, ist die Schwierigkeit, diese großartigen Entdeckungen mit ihrer inhärenten Ästhetik dem Laien zu vermitteln. Je allgemeiner eine Theorie, desto weiter muß sie sich von den menschlichen Maßstäben entfernen. Der Trick, Newton mit Fallobst populär zu machen, muß heute scheitern, selbst wenn die Hochenergieforscher das Wort *quark* bei James Joyce entlehnen und die Eigenschaften der Quarks mit Wörtern wie Charme, Farbe und *strangeness* umschreiben. Diese vertrauensbildenden Begriffe sind Namen aus fernen, unvermeidlich stark abstrahierten mathematischen Räumen. Noch schlimmer wird es bei weit im dunkeln liegenden Ansätzen wie einer erhofft universellen Theorie der *strings*, fadenförmiger, geisterhafter und vielleicht gar nicht für die Beschreibung von Teilchen und ihren Wirkungen zutreffender Gebilde mathematischer Verallgemeinerungen; Horgan schildert treffend den trotzigen Versuch und die nagenden Zweifel mit derlei Vermutungen.

Eine Gesellschaft flacher Medien und primitiver Allgemeinplätze liegt dem Forscher nicht; im Kampf um Einschaltquoten des menschlichen Interesses unterliegt er – das schmerzt natürlich und schürt Untergangsstimmung. Galileo Galilei und Giordano Bruno, diese Vorfahren wurden doch noch von den Mächtigen bitterernst genomen! Albert Einstein hatte eine ganz einfache Formel zu bieten, zudem gab es da den im Weltraumflug langsamer alternden Zwillingsbruder als sehr menschliche Anschauung. Auch unter den Quanten und der Unschärfe konnte man sich noch etwas vorstellen und ahnen, daß hier die Prinzipien der menschlichen Erkenntnis irgendwie berührt werden. Die bedrohlich riesigen Energievorräte im Atomkern gingen noch jedermann etwas an. Die Quarks aber spüren wir nicht als einzelne Bestandteile der Natur – und der Urknall ist ja so lange her. Die vielen heutigen Probleme der Menschheit scheinen von den Grundlagen der Naturerkenntnis gar nicht mehr berührt zu sein. Dazu wären eher die umsetzenden Ingenieure und deren angewandte Forschung gefragt, aber jenen verweigern Horgan und seine Freunde jeglichen Adel des Fundamentalen. Auch dieses öffentliche Verschmähen der Grundlagen verursacht Enttäuschung und Endzeitfrust.

Wissenschaftler dürfen sich nicht wie Künstler oder Filmstars zeigen. Zu ihrem Grundprinzip der Objektivität gehört Zurückhaltung. Besonders die Naturwissenschaftler verdrängen bewußt und hart das Persönliche, erst recht die Psyche, die für Horgan so wesentlich ist. Die kritischen Fachkollegen mit ihren Verpflichtungen zur Überprüfung durch Falsifizierung sind die allein gültigen Wertmesser. Metaphysische Spekulation ist schon seit Newton verpönt. Horgans Buch verstößt ganz gezielt gegen diese Regeln; gerade das macht es so ungewöhnlich und spannend. Für den Fachmann wirkt manche Subjektivität ärgerlich oder sogar verletzend. Anspruch auf Tiefe und Exaktheit kann einer solchen Reportagensammlung nicht abverlangt werden; eigentlich ist auch kein Vorwurf der Schlampigkeit angebracht, vor allem weil Horgan seinen Text weitgehend auf wörtliche Zitate abstützt. Der Laie aber wird – trotz großer Mühen Horgans und trotz seines Geschicks – die entscheidenden Konsequenzen kaum selbständig bewerten können. Der Text ist meist doch recht schwierig.

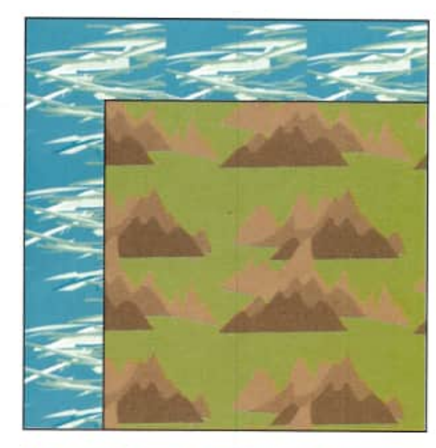
Den Fernerstehenden wird also der Blick in die von Forschung geprägten Persönlichkeiten der Gelehrten die vermutlich stärkste Faszination bescheren; hierauf ist das Buch optimiert worden, sein Autor ist schließlich Journalist! Anerkennung gebührt John Horgan für sein jahrelanges Streben, mit den Exponenten der angelsächsischen Forschung sorgfältig vorbereitete, bedeutsame Gespräche zu führen und hier zusammenzustellen. Das heute wohl unvermeidliche Reißerische hält sich in Grenzen. Auch die deutsche Übersetzung ist annehmbar. Dem Leser wird jedenfalls der Blick auf die Grenzen geschärft, er wird ermuntert und vorbereitet, den Fortgang moderner Forschung kritischer zu verfolgen und gespannt zu prüfen, ob wir denn tatsächlich am Ende angelangt seien.

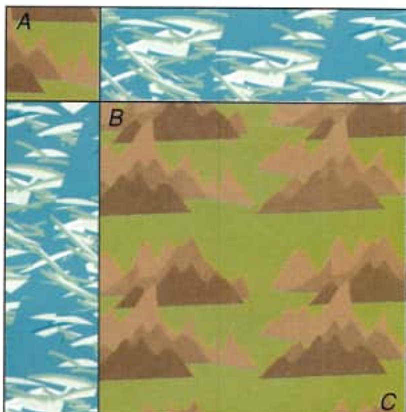
Prof. Dr. Hans-Joachim Queisser
Max-Planck-Institut für Festkörperforschung, Stuttgart.

Preisrätsel

von Natalie van Eijk

Quadland





Quadland besteht zu 16 Teilen aus Land und zu neun Teilen aus Wasser. Sowohl die Gesamtfläche als auch das Land sind quadratisch (Karte oben).

Die Vereinigung „Landverschiebung jetzt" konnte einen Plan im Kabinett durchsetzen, nach dem Quadland in zwei Landquadrate umgebaut werden soll. Das Verhältnis der Flächeninhalte zwischen Land und Wasser bleibt davon unberührt. Ein Quadrat berührt A, das andere C mit je einer Ecke, und beide sollen sich in B, der neuen Hauptstadt, berühren (siehe Karte unten).

Konstruieren Sie mit Zirkel und Lineal den Berührpunkt B.

Schicken Sie Ihre Lösung in einem frankierten Brief oder auf einer Postkarte an Spektrum der Wissenschaft, Leserservice, Vangerowstraße 20, D–69115 Heidelberg.

Unter den Einsendern der richtigen Lösung verlosen wir fünf Exemplare des Buches „Vom Quark zum Kosmos". Der Rechtsweg ist ausgeschlossen. Es werden alle Lösungen berücksichtigt, die bis Dienstag, 11. November 1997, eingehen.

Lösung zu „Gut gespart ist halb gewonnen" (September 1997)

Heike Schöttle muß für einen Karton gebrauchter Tennisbälle 22 Mark bezahlen.

Gerald Wegner aus Bayreuth bezeichnete mit G den Preis für einen Karton gebrauchter und mit N den für einen Karton neuer Bälle, mit n die Anzahl der Zehnmarkscheine und mit x die Anzahl der Kartons alter Bälle. N und G müssen ganze Pfennigbeträge sein. x und n sind natürliche Zahlen. Dann sind die Aussagen des Rätsels wie folgt in Gleichungen und Ungleichungen umzusetzen:

„Die Zeiten, als der gebrauchte Ball noch für eine Mark zu haben war, sind schon lange vorbei":

(1) $G > 4$ DM

„24,75 DM ist mehr als der Preis eines Kartons neuer Bälle":

(2) $N < 24{,}75$ DM

„Heike Schöttle kauft fünf Kartons neue und einige Kartons gebrauchte Bälle. Sie bezahlt nur mit Zehnmarkscheinen und erhält 2,50 Mark zurück":

(3) $xG + 5N = n\,10$ DM $- 2{,}50$ DM

„Wenn sie fünf Kartons gebrauchte Bälle und genausoviel neue wie vorhin gebrauchte gekauft hätte, hätte sie 24,75 Mark gespart":

(4) $xG + 5N = 5G + xN + 24{,}75$ DM

Aus Gleichung (4) folgt dann durch Umformung:

(5) $(5-x)(N-G) = 24{,}75$ DM

Es muß $x<5$ sein; sonst wären gebrauchte Tennisbälle teurer als neue. Da 24,75 DM ungerade ist, muß auch $5-x$ ungerade sein. Deshalb bleiben für x noch die Werte 4 und 2. Für $x = 4$ ist $N-G=24{,}75$ DM und damit $N \geq 24{,}75$ DM, was Ungleichung (2) widerspricht. Aus Gleichung (5) mit $x=2$ folgt:

(6) $G = N - 8{,}25$ DM

Subtrahiert man Gleichung (3) von Gleichung (4) und setzt $x=2$ sowie $G=N-8{,}25$ DM ein, so folgt:

(7) $N = n(10/7)$ DM $+ 2$ DM

Damit N ein ganzzahliger Betrag wird, muß n ein ganzzahliges Vielfaches von 7 sein.

$n=7$ ergibt $N = 12{,}00$ DM, was Gleichung (6) und Ungleichung (1) widerspricht.

$n \geq 21$ ergibt $N \geq 32{,}00$ DM, was Ungleichung (2) widerspricht.

Als einzige Möglichkeit bleibt also $n = 14$ und damit $N = 22$ DM. Ein Karton gebrauchter Bälle kostet 22 Mark.

Wer sagt eigentlich, daß neue Bälle teurer als die gebrauchten sein müssen und damit $x \leq 5$ sein muß, dachte sich Jürgen Fenster aus München.

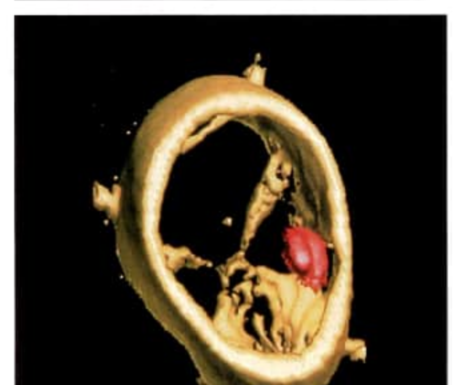
Bei gutem Marketing lassen sich Bälle, die beispielsweise von Martina Hingis gebraucht wurden, sicherlich teurer als neue verkaufen.

Jürgen Fenster fand unter dieser Annahme 186 weitere richtige Lösungen mit Kartonpreisen für neue Bälle zwischen 1,20 DM und 24,58 DM.

Der Preis für das Sonderangebot mit nur kurz von Boris Becker gespielten Bällen beträgt 19,99 DM statt 19,66 DM für einen Karton neuer Bälle. Heike kauft 80 Kartons BBB (Boris-Becker-Bälle) und bezahlt immerhin 1697,50 DM.

Der kleinste mögliche Preisunterschied ist ein Pfennig: 23,82 DM für einen Karton neuer Bälle und 23,83 DM für einen Karton gebrauchte. In diesem Fall ist das Bezahlen mit 5922 Zehnmarkscheinen (2,50 DM Rückgeld) für 2480 Kartons gebrauchte plus fünf neue allerdings etwas mühsam.

Die Gewinner der fünf CD-ROMs „The day after trinity" sind Olaf Anthes, Jeckenbach; Sylvia Wiebrock, Berlin; Volker Teuchert, Weimar/Lahn; Hans Koppe, Nürtingen; und Ralph Bergmann, Gundelfingen.



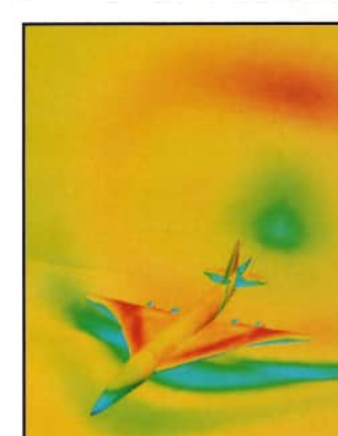
Gentherapie bei Krebs
Eingeschleuste fremde DNA soll Tumoren bekämpfen helfen. Noch gibt es nur wenige Erfolge, doch sind die einzelnen Konzepte vielversprechend.

Verewigte Körper
Die neue Konservierungstechnik Plastination macht Gewebe, Organe und ganze Leichen – gerade auch des Menschen – zu besonders anschaulichen und aussagekräftigen, zudem unbegrenzt haltbaren anatomischen Präparaten.

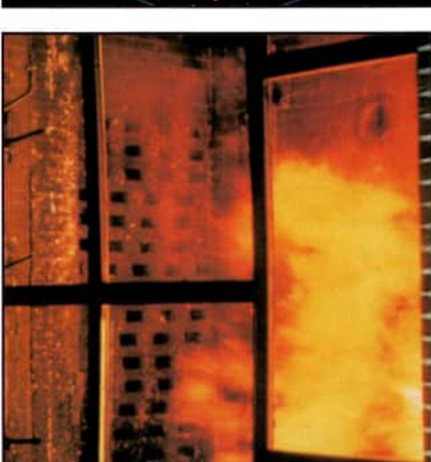




Der Nachweis des Top-Quarks
Viele hundert Physiker und Techniker waren daran beteiligt, den schwersten Grundbaustein der Materie zu finden. Diese Entdeckung hat weitreichende Folgen für die Teilchenphysik.



Modellieren von Turbulenzen
Erst seit kurzem reicht die Leistung der größten Rechner aus, ein Allerweltsphänomen hinreichend präzise nachzubilden: turbulente Strömung in Flüssigkeiten und Gasen. In Einzelfällen ist sogar gezieltes Beeinflussen möglich.



Technische Gläser
Die Variabilität des sehr alten Werkstoffs Glas, erst neuerdings erkannt und ausgemünzt, ermöglicht vielfältige Anwendungen. Faserverbunde und Glaskeramiken erweitern das Spektrum ebenso wie Verfahren zur mikrofeinen Strukturierung der Oberflächen.

Künstliche Membranporen
Gentechnisch erzeugte Tunnelproteine für biologische und synthetische Membranen könnten zur Zielsteuerung von Arzneistoffen oder als Biosensoren zum Nachweis giftiger Chemikalien dienen.



FORUM: Hochschul-Perspektiven
Bund und Länder haben sich über die Inhalte eines neuen Hochschulrahmengesetzes geeinigt. Welche der dringlichen Reformen in Forschung und Lehre werden damit möglich?



Elektronenmusik
Die Suche nach neuen Ausdrucksformen mit technischen Mitteln hat die zeitgenössische E- und U-Musik nachhaltig geprägt. Elektrifizierung und Digitalisierung könnten sich ebenso tiefgreifend auswirken wie einst Notendruck und Schallplatte.




MEHR
SEHEN
MEHR
VERSTEHEN
PLANET
Erleben Sie Fernsehen völlig neu. Anspruchsvoll, eindrucksvoll – und so abwechslungsreich wie unser Planet. Der deutsche Sender für exklusive Reportagen und packende Dokumentationen.
INFORMATION
DF1 Infoline:
0180/33 003